

Данный файл представлен исключительно в ознакомительных целях.

Уважаемый читатель!

Если вы скопируете данный файл,
Вы должны незамедлительно удалить его сразу после ознакомления с содержанием.
Копируя и сохраняя его Вы принимаете на себя всю ответственность, согласно действующему международному законодательству .
Все авторские права на данный файл сохраняются за правообладателем.
Любое коммерческое и иное использование кроме предварительного ознакомления запрещено.

Публикация данного документа не преследует никакой коммерческой выгоды. Но такие документы способствуют быстрейшему профессиональному и духовному росту читателей и являются рекламой бумажных изданий таких документов.

Френкель Г. Я., канд. техн. наук. Протекторная защита от коррозии механического оборудования и специальных стальных конструкций гидротехнических сооружений. М.: Гидропроект, 1993.

Настоящая книга ставит своей целью ознакомить с протекторной защитой от коррозии специалистов научно-исследовательских, проектно-конструкторских и ремонтных организаций, занимающихся вопросами защиты металлических изделий в водных средах длительное время или периодически.

В книге даны современные представления о рекомендуемых и применяемых материалах протекторов, их конструкциях, способах монтажа на защищаемых изделиях, расчетах сферы их влияния и областях применения, а также о целесообразности применения протекторной защиты от коррозии.

Табл. 4, ил. 7.

Научные редакторы — Е. А. Билев, рецензент — В. В. Пронский,
редактор — В. В. Афанасьев

© Государственный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект», 1993.

ВВЕДЕНИЕ

Разрушение металла, вследствие взаимодействия его с коррозионной средой, начинается с поверхности раздела фаз. Первопричиной коррозии является термодинамическая неустойчивость металла, которая определяется не только природой металла, его микроструктурой, но и характером коррозионной среды. Весьма существенными факторами при этом являются: температура; запыленность; химический состав воды; значение pH; присутствие кислорода, коррозионно-опасных ионов и пр.

При погружении металла в электролит (воду) происходит переход положительно заряженных ионов металла из кристаллической решетки в электролит, что вызывает разрушение решетки, потерю массы металла (толщины) и таких важных свойств металла, как пластичность, прочность, твердость, временное сопротивление разрыву или сжатию, относительное удлинение, электросопротивление и т. д.

Следовательно, коррозия металла — это процесс, в результате которого разрушается металлическая поверхность изделия и изменяются физико-механические (рабочие) свойства металла.

Особый интерес к вопросам борьбы с коррозией проявился в последние годы. Это вызвано следующими причинами:

1. Резко возросли темпы и объемы использования металлов в народном хозяйстве.

Увеличение металлофонда заметно повысило и уровень потерь, вызванных коррозией. Так, металлофонд земного шара оценивается в 3 млрд. т. Вследствие коррозионного воздействия ежегодно разрушается и практически безвозвратно теряется для человечества до 50 млн. т металла. По экспертным оценкам, бывший Советский Союз в 1988—1991 гг. ежегодно расходовал 20÷25 млн. т стали, т. е. на коррозию «работала» каждая пятая—шестая домна страны.

2. Коррозия стала фактором, способствующим загрязнению окружающей среды.

Ряду отраслей экономики, в которых отмечается особенно интенсивное коррозионное повреждение металла, в последнее время приходится тратить больше средств на борьбу с коррозией.

В качестве примера можно отметить, что из общих затрат на капитальный ремонт объемы работ, связанные с устранением коррозионного разрушения по трубопроводному транспорту, составляют около 90%, по нефтедобыче — от 50 до 85%, по химической промышленности — 45%, по нефтеперерабатывающей — 30%, по морскому флоту — 25%. Любое нарушение герметичности газопровода или химического реактора из-за коррозионных повреждений может привести к выбросу в атмосферу токсичных веществ, способствующих росту коррозионной агрессивности среды.

Однако аварийный выброс веществ не является единственным видом воздействия коррозии на экологию. Так, выплавка 20÷25 млн. т стали (столько уходит на замену прокорродировавших металлоизделий) сопровождается выбросом в окружающую среду до 1 млн. т пыли, 600—700 тыс. т сернистого ангидрида и до 1 млн. т окиси углерода.

Кроме того, большое количество природных вод загрязняется отходами металлургического производства. В результате воздействия окружающей среды в нашей стране ежегодно выходят из строя 1,5÷2,0% общего объема железобетонных конструкций, или 2,5÷5,0 млн. м³. При этом стальная арматура, на которую расходуется около 15 млн. т проката в год, разрушается практически полностью.

3. Экономическая оценка ущерба, причиняемого коррозией народному хозяйству.

В настоящее время проблема оценки потерь, причиняемых коррозией, обращает на себя внимание как отдельных ученых и фирм, так и государственных организаций.

По оценке специальных служб, изучающих потери, причиняемые коррозией, ущерб от нее, наносимый экономике промышленно развитых стран, составляет 4÷5% годового национального дохода. На начало 80-х годов потери в нашей стране составили около 70 млрд. руб.

Потери от коррозии принято разделять на прямые и косвенные. Прямые потери — стоимость заменяемых прокорродировавших конструкций и механизмов или их частей, включая стоимость затраченного труда. В бывшем СССР прямые потери в 1980 г. оценивались в 25 млрд. руб.

Косвенные потери значительно превышают прямые и включают простои оборудования, потери продукции, производительности машин и механизмов, загрязнение и заражение продуктов и т. д. Кроме указанных косвенных потерь, необходимо учитывать трудно оцениваемые последствия коррозии, например загрязнение окружающей среды, утечку нефтепродуктов, газа, химических и радиоактивных веществ, уменьшение природных ресурсов, ухудшение условий труда, создание аварийных ситуаций в промышленности, на транспорте и т. д.

Характеризуя экономический ущерб от коррозии, необходимо обратить внимание на то, что к сумме ущерба, вызванного непосредственно коррозией, следует прибавить также затраты на проведение антикоррозионных мероприятий.

Наряду с традиционными мерами борьбы с коррозией, такими как разработка конструкций и деталей из нержавеющей сталей, использование металлических и лакокрасочных покрытий, осушка воздуха, тара и упаковка, летучие и водорастворимые ингибиторы коррозии, в последние годы все большее значение приобретают ме-

тоды электрохимической защиты от коррозии изделий, эксплуатируемых периодически или длительное время в водных средах, — катодная и протекторная защита.

Скорость коррозии металлической поверхности можно значительно снизить, заряжая поверхность защищаемого изделия током от внешнего источника (катодной станции) и вспомогательного анода. Такая электрохимическая защита называется катодной защитой.

Однако катодная защита имеет ряд существенных недостатков:

- 1) при использовании катодной защиты необходима дорогостоящая катодная станция;
- 2) в процессе работы не всегда устойчиво и надежно действует соединение анодов с катодной станцией;
- 3) для постоянного контроля за работой катодной станции необходимо иметь штат контролеров.

Протекторная защита имеет значительные преимущества перед катодной, так как в этом случае не требуется катодная станция, а протектор сам заряжает поверхность изделия, имея более электроотрицательный потенциал, чем изделие.

Применение протекторов позволяет лучше приспособить систему защиты к особенностям конструкции и местным условиям, обеспечить более равномерное распределение защитного тока, упростить устройство и эксплуатацию защитной системы, а также устранить опасность взрывообразования от случайной искры.

Правильное использование при строительстве и эксплуатации средств протекторной защиты механического оборудования и специальных стальных конструкций гидротехнических сооружений позволяет обеспечить их надежную и долговечную работу.

Глава I. МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ, ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ И ЯВЛЕНИЕ ЗАЩИТНОГО ЭФФЕКТА

Электрохимическая защита позволяет предотвратить коррозионные и коррозионно-механические разрушения в водной среде (морская, речная, озерная вода) практически всех конструкционных металлических материалов, применяемых в гидротехнических сооружениях, судостроении, мелиорации и других отраслях, в том числе после различных технологических операций их обработки (сварки, гибки, правки и пр.). Механизм действия этой защиты заключается в катодной поляризации металлической конструкции до потенциала наиболее анодных участков ее поверхности.

Различают две разновидности электрохимической защиты. При питании анодных заземлителей от внешнего источника тока (выпрямителя, генератора) защита, как указывалось во введении, называется катодной; при подключении к защищаемой конструкции гальванического анода электроотрицательного металла (протектора) — протекторной.

Вследствие разности потенциалов между протектором и конструкцией по соединяющему их проводнику (в результате действия образовавшегося микрогальванического элемента) пойдет электрический ток. Электроэнергия в этом элементе получается за счет расходования активного материала протектора — гальванического анода, тогда как катод этого элемента (защищаемая конструкция) остается инертным.

Защищаемая от коррозии конструкция подвергается поляризации с помощью протектора, что приводит к смещению потенциала конструкции в отрицательную сторону и подщелачиванию слоя электролита, непосредственно прилегающего к металлу. Благодаря подщелачиванию на поверхности металла образуется осадок гидроксида и карбонатов кальция и магния, похожий на накипь. Эти гидроксиды — карбонатные осадки — создают особые условия на поверхности металла: с одной стороны, они как бы экранируют поверхность, а с другой, затрудняют диффузию кислорода, так как увеличивают толщину защитного слоя.

Скорость образования солевого осадка определяется количеством растворенных в воде солей магния и кальция и плотностью тока (или количеством электричества). Поэтому в растворах относительно более концентрированных (например, морская вода) осадок образуется быстрее, чем в речной воде.

Предложенный способ позволяет применить электрохимическую защиту гальваническим анодом (протекторную) от коррозии с использованием защитных свойств солевых отложений, образующихся на катодно-поляризуемой поверхности металла.

Широкое распространение протекторной защиты объясняется ее высокой технико-экономической эффективностью, доступностью, простотой и надежностью в процессе эксплуатации металлоконструкций. За весь период срока службы протектора защита не требует обслуживания.

Применение активной защиты от коррозии гальваническими анодами (протекторами) рекомендуется совмещать с использованием защитных лакокрасочных покрытий, что позволяет значительно снижать расход тока, а следовательно, и расход протекторного сплава, и удлинять в несколько раз срок службы протекторной защиты. Практика эксплуатации металлоконструкций в различных водных средах показала, что одно лакокрасочное покрытие (даже при хорошем технологическом исполнении — сополимерные грунты плюс перхлорвиниловые лаки и эмали, нанесенные на опескоструенную поверхность) оказывает защитное действие до 4—5 лет, а в случае применения комбинированного способа защиты (ЛКП плюс протекторы) срок защитного действия увеличивается до 18—25 лет. Применение протекторной защиты в тех же средах для металлоконструкций без ЛПК и предварительной подготовки поверхности, т. е. ее очистки от окислов и ржавчины, обеспечит защиту поверхности в течение 12—15 лет (за это время израсходуется протекторный сплав).

Явление защитного эффекта вызывается торможением работы коррозионных микроэлементов вследствие поляризации корродирующей поверхности. Рассмотрим корродирующую систему как бинарный короткозамкнутый гальванический элемент ($K-A$ на рис. 1), к которому добавляется третий электрод (Zn), являющийся в данном случае наиболее эффективным анодом (протектором). При этом на поляризованной диаграмме коррозии (рис. 2) обозначены: $V_A^0 B$ — кривая анодной поляризации; $V_K^0 L$ — кривая катодной поляризации; точка S определяет потенциал коррозии V_x и ток коррозии без применения электрохимической катодной защиты (без контакта с Zn); $V_{Zn}^0 M$ — анодная поляризационная кривая для присоединенного нового более сильного анода — протектора (Zn); $V_{Zn}^0 N$ — общая, суммарная анодная кривая для трехэлектродной гальванической системы; V_y — общий потенциал трехэлектродной системы, т. е. общий потенциал системы после присоединения протектора; $V_y I$ — внешний катодный ток электрохимической защиты и отрезок mn , равный ему коррозионный ток микропар после присоединения протектора.

Диаграмма показывает, что после присоединения протектора коррозионный ток значительно уменьшился по сравнению с начальным током ($V_x S$). Очевидно, чем отрицательнее начальный потенциал протектора и более полого идет кривая анодной поляризации протектора, т. е. чем менее поляризуем протектор (например,

больше его площадь), тем сильнее сдвинут потенциал трехэлектродной системы в отрицательную сторону и меньше остаточный коррозионный ток микропар. При достаточном смещении общего потенциала системы (V_y) в отрицательную сторону (до потенциала V_A^0) ток коррозии может стать равным нулю — наступит полная защита.

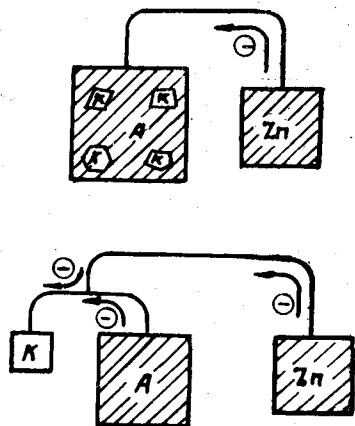


Рис. 1. Корродирующая система:

1 — контакт корродирующего металла (K—A) с анодом (Zn);
2 — эквивалентная трехэлектродная модель для интерпретации явления защитного эффекта

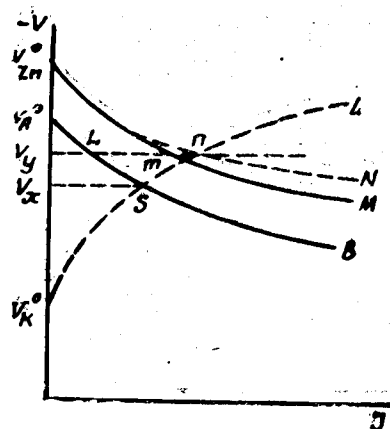


Рис. 2. Поляризационная диаграмма коррозии, поясняющая явление защитного эффекта:

$V_A^0 B$ — анодная и $V_K^0 L$ — катодная кривые для сложного электрода; $V_{Zn}^0 M$ — кривая для анодного контакта; $V_{Zn}^0 N$ — общая анодная кривая

Аналогично явлению разностного эффекта можно говорить о коэффициенте защитного эффекта $K_{3э}$, имея в виду величину уменьшения работы коррозионных микропар при увеличении плотности тока внешней катодной поляризации на единицу (например, на 1 мА). Можно вывести зависимость константы защитного эффекта от величины катодной и анодной поляризуемости системы и показать, что для случая, когда поляризационные кривые близки к прямым, $K_{3э}$ будет приблизительно постоянным и, следовательно, общий защитный эффект пропорционален плотности катодного тока.

Поясним это на схеме рис. 3. Здесь $V_K^0 C$ и $V_A^0 A$ — идеальная катодная и, соответственно, анодная кривые для исследуемой коррозионной системы в данных условиях; V_x — потенциал коррозионной системы при отсутствии электрохимической защиты. Если при-

менить электрохимическую защиту (путем присоединения протектора или катодной поляризации извне приложенным напряжением), потенциал корродирующей системы сместится к более отрицательному значению V_x' . При этом ток коррозии уменьшится от значения $V_x b$ до $V_x' a$, внешний катодный ток будет равен значению aC .

Полная защита будет наблюдаться в том случае, если, благодаря катодной поляризации, потенциал корродирующей системы станет равным или более отрицательным, чем значение начального потенциала анодного процесса V_A^0 .

Обозначим протекторным или защитным эффектом (ЗЭ) уменьшение работы микроэлементов (уменьшение коррозии системы) при катодной поляризации системы. Если рассматривать поляризационные кривые в точке их пересечения v' на рис. 3 как прямые (что с большей степенью вероятности выполняется, когда внешний ток катодной поляризации не очень велик), то можно показать, аналогично тому, как это сделано для разностного эффекта, наличие прямой пропорциональности между защитным эффектом и плотностью наложенного катодного тока.

На основании построения на рис. 3 для этого случая можно записать

$$\Delta V = bC \operatorname{tg} \beta; \Delta V = ab \operatorname{tg} \alpha.$$

Разделив первое выражение на второе, получим

$$1 \frac{bC}{ab} \cdot \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} \quad \text{или} \quad \frac{bC}{ab} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta}.$$

Далее можно записать

$$\frac{bC}{ab} + 1 = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta} + 1,$$

или

$$\frac{bC + ab}{ab} = \frac{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

Так как отрезок aa' представляет защитный эффект (ЗЭ) при катодной поляризации внешним током i , изображаемым отрезком $aC = vC + av$,

$$\text{то} \quad \frac{i}{3\mathcal{E}} = \frac{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta},$$

$$\text{откуда} \quad 3\mathcal{E} = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta} i,$$

$$\text{или} \quad 3\mathcal{E} = K_{3\mathcal{E}} \cdot i,$$

$$\text{где} \quad K_{3\mathcal{E}} = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}.$$

При постоянных α и β , т. е. при постоянных значениях катодной и анодной поляризуемости, коэффициент защитного эффекта $K_{3\mathcal{E}}$ будет константой.

Если считать, что катодная и анодная поляризуемость (P_K и P_A) находятся в линейной зависимости от плотности тока, т. е.

$$\operatorname{tg} \alpha = P_A \text{ и } \operatorname{tg} \beta = P_K, \text{ то } K_{3\mathcal{E}} = \frac{P_K}{P_K + P_A} \text{ или } K_{3\mathcal{E}} = \frac{1}{1 + \frac{P_A}{P_K}},$$

то защитный эффект, т. е. уменьшение локального тока с возрастанием внешнего катодно-поляризующего тока, будет тем больше, чем больше катодная поляризуемость защищаемой коррозионной системы.

Если поляризационные кривые близки к прямым, то это правило действительно во всем диапазоне тока поляризации. Если поляризационные кривые не могут рассматриваться как прямые, то указанное правило также соблюдается, но только при сравнительно небольших внешних токах по сравнению с величиной, определяемой абсциссой точки пересечения поляризационных кривых.

Глава II. МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СИСТЕМАХ ПРОТЕКТОРНОЙ ЗАЩИТЫ

В большинстве случаев от коррозии защищаются изделия, изготовленные из углеродистой или низколегированной стали. Оптимальный для них защитный потенциал может быть достигнут в реальных условиях при использовании протекторов, изготовленных из цинка, алюминия, магния. Для материалов с более положительными защитными потенциалами (например, высоколегированных сталей, сплавов меди, никеля или олова) следует применять протекторы из железа или активированного свинца.

Для изготовления механического оборудования и специальных стальных конструкций гидротехнических сооружений в основном применяют углеродистую или низколегированную сталь, поэтому в настоящем разделе рассматриваются материалы, используемые для протекторов, на основе цинка, алюминия и магния.

Эти материалы (сплавы) имеют высокие физико-химические характеристики, обеспечивающие возможность создания эффективных и долговечных систем защиты от коррозии. Химический состав протекторных сплавов регламентирован ГОСТ 26254-84 (СТ СЭВ 4046-83) и приведен в табл. 1.

Как отмечено выше, протекторы изготавливаются не из чистых металлов, а из сплавов. Некоторые легирующие элементы предназначены для получения мелкозернистой структуры протектора, что способствует более равномерной защите изделий. Другие — для уменьшения собственной коррозии (растворимости) протектора, а следовательно, для увеличения его токоотдачи. И, наконец, третьи — для уменьшения или предотвращения склонности к образованию на протекторе поверхностного слоя (пассивируемости), ослабляющего его действие.

Пассивируемость протекторов (гальванических анодов) должна быть возможно меньшей. Металлы, используемые в протекторах, образуют ряд труднорастворимых соединений, в числе которых могут быть основания, оксигидраты, оксиды, карбонаты, фосфаты и разнообразные основные соли. При использовании протекторов в химической аппаратуре необходимо принимать во внимание, что могут образовываться и другие труднорастворимые соединения. Вышеназванные труднорастворимые соединения на работающих протекторах обычно не образуются по причине снижения значения pH в результате гидролиза, в то же время на катоде (защищаемом изделии) происходит повышение щелочности. Если протектор (анод) мало нагружен или концентрация мешающих ионов слишком велика, то труднорастворимые соединения могут выпадать и на нем, образуя покрытие на поверхности протектора (анода). Некоторые из этих покрытий получаются мягкими, пористыми (проницаемыми) и не нарушают нормальной работы протектора. Другие слои оказываются плотными и твердыми, как эмаль. Они полностью и устойчиво блокируют протектор, нарушая его работоспособность. При высушивании поверхности защищаемого изделия такие покрытия могут изменять свою структуру и становиться пористыми и крошащимися. Это позволяет устранить блокирование протектора путем очистки металлическими щетками.

Протекторы должны быть возможно менее поляризуемыми. Под нагрузкой значение их потенциала становится более положительным. Степень этого изменения имеет важное значение для практически допустимой нагрузки.

Другим свойством протектора как анода в коррозионном элементе является эквивалентность между нагрузкой и массой. Этот показатель называется токоотдачей. Он получается тем выше, чем меньше атомная масса и выше валентность металла протектора.

Для оценки практической пригодности теоретическая токоотдача сама по себе не является определяющей, поскольку под анодной

Таблица 1

Марка сплава	Основные компоненты, %								Примеси не более, %				
	Al	Zn	Mn	Cu	Hg	Sn	Ti	Mg	Fe	Cu	Ni	Pb	Si
МП-1	5—7	2—4	0,002—0,5	—	—	—	До 0,04	Остальное	0,3	0,004	0,001	—	0,04
АП-3	Остальное	4—6	—	—	—	—	—	—	0,1	0,01	—	—	0,1
АП-4	»	4—6	—	—	—	0,05	—	0,5—1,0	0,1	0,01	—	—	0,1
ЦП-1	0,4—0,6	Остальное	—	—	—	—	—	—	0,001	0,001	—	0,005	—
ЦП-2	0,5—0,7	»	—	—	—	—	—	0,1—0,3	0,004	0,001	—	0,005	—
ЦП-3	0,2—0,6	»	—	—	0,1	—	—	—	0,005	0,001	—	0,005	—
МП-1	1,0—2,0	—	Остальное	2,0—3,0	—	—	—	—	0,25	—	—	—	0,5

нагрузкой большинство материалов протекторов обеспечивает токоотдачу, которая меньше теоретической.

Разность между теоретической и фактической токоотдачей (выход по току) соответствует собственной коррозии самого материала протектора. Ее причиной являются катодные побочные реакции или анодная реакция, протекающая иногда с аномальной валентностью ионов металла протектора.

Изучая свойства материалов, из которых изготавливаются протекторы, применяемые для механического оборудования и специальных стальных конструкций гидротехнических сооружений, морских и речных судов, следует отметить, что цинковые протекторы применялись еще с 1824 г. для защиты стальных судов, однако впервые примененный так называемый «котельный» цинк, имеющий примесь железа свыше 0,015%, меди — свыше 0,09%, свинца — свыше 0,08%, оказался не пригоден, поскольку он покрывался толстым, твердым слоем отложений и становился пассивным. При использовании высокочистого цинка (чистота 99,995), содержащего железа менее 0,0014%, последний пригоден в качестве материала для изготовления протекторов без дополнительных добавок. Такой цинк регламентирован стандартом военного ведомства США и допущен для протекторной защиты в военно-морском флоте России, ФРГ, Швеции и других стран.

Протекторы из чистого цинка обычно имеют крупнозернистую структуру столбчатых дендритов, которая ведет к неравномерной коррозии (ускоренной потере массы) протектора. По новейшим техническим условиям, к цинку добавляют до 0,15% Cd и 0,5% Al, благодаря чему достигается значительное измельчение зерна структуры и компенсируется вредное влияние повышенного содержания железа (выше 0,005%).

Скорость собственной коррозии цинковых протекторов (в холодной стоячей питьевой воде) достигает 20—30 мкм в год. В холодной морской воде годовая потеря металла протектора достигает 35 мкм. В текущих водах это значение на 12—15% выше. В горячей воде цинк, вследствие склонности к пассивации, практически не пригоден.

Несмотря на сравнительно малое напряжение, создаваемое цинковыми протекторами, они нашли широкое применение для наружной защиты судов в США, а также в военно-морском флоте России и ФРГ. Применение цинковых протекторов на затворах и сороудерживающих решетках, а также на другом оборудовании Киевской ГЭС защитило указанное оборудование и специальные конструкции на 95—100%.

Алюминий в чистом виде не пригоден в качестве протекторного материала, поскольку уже на воздухе приобретает плотную пассивирующую оксидную пленку. Однако, будучи более дешевым материалом, чем цинк, он, безусловно, представляет экономический ин-

терес, поэтому в него вводят активизирующие легирующие добавки, ограничивающие, а иногда и полностью предотвращающие образование пассивирующих оксидных пленок.

Обычно в алюминиевые протекторные сплавы вводят до 6% цинка или до 1% магния, а также в небольших количествах другие примеси, указанные в табл. 2, которые создают эффект увеличе-

Таблица 2

Марка сплава	Плотность, г/см ³	Токоотдача				Выход по току (КПД), %	Отрицательный потенциал, мВ		Норма расхода протекторного материала, КГС, м ² /год	
		А · ч/см ²		А · ч/кг			стационарный	при поляризации	окрашенных	неокрашенных
		теоретическая	фактическая	теоретическая	фактическая					
МП-1	1,8	3,96	2,59	2200	1440	65	1300	1200	0,15	0,65
АП-3	2,8	8,06	7,14	2880	2450	85	750	700	0,08	0,35
АП-4	2,8	8,06	7,14	2880	2450	85	920	830	0,06	0,25
ЦП-1	7,1	5,82	5,54	820	780	95	800	730	0,30	1,10
ЦП-2	7,1	5,82	5,54	820	780	95	800	730	0,30	1,10
ЦП-3	7,1	5,82	5,54	820	780	95	840	750	0,25	1,10
МПП-1	7,3	7,11	6,35	975	870	90	830	780	0,25	0,95

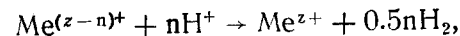
ния параметра решетки и длительное время поддерживают активность протектора. Активированию, разумеется, способствует и собственная коррозия протекторов. Чтобы поддерживать токоотдачу на оптимальном уровне, применяют также и элементы, уменьшающие параметр решетки. К таким элементам относятся: марганец, кремний и титан.

Технология легирования алюминиевых протекторных сплавов довольно сложна, так как растворимость отдельных компонентов в основном металле ограничена. Например, олово при комнатных и низких температурах плохо растворяется в алюминии. Поэтому, для того чтобы растворенное в расплаве олово присутствовало в готовом протекторе в тонкораспределенном состоянии, следует проводить многочасовую термическую обработку сплава при температуре 500—550°С с последующей закалкой.

Алюминиевые протекторы с цинком и индием в качестве активаторов приобрели довольно широкое распространение; именно эти протекторы предпочтительны для защиты сооружений в прибрежном шельфе и портовых прибрежных сооружениях. Скорость собственной коррозии алюминиевых протекторных сплавов и ее зависимость от токовой нагрузки и внешней среды колеблется в соответствии с типом легирования и химическим составом в широких пределах и всегда более высока, чем у цинковых протекторов.

Кроме того, материал протектора в области литейной корки может вести себя совершенно иначе, чем в сердцевине. В особенности это относится к протекторам, содержащим олово, если температурный режим при их изготовлении не был оптимальным. У некоторых алюминиевых сплавов потенциал с течением времени становится более отрицательным, причем установившиеся значения потенциала достигаются только спустя несколько часов или даже суток. Например, у протекторных сплавов, содержащих ртуть и повышенное содержание магния, потенциалы в начале службы могут иметь слишком отрицательное значение, но после кратковременной работы приобретают нормальные значения. Поляризуемость алюминиевых протекторных сплавов также весьма различна. Следует отметить, что при требуемом сроке защиты в 20—25 лет особо благоприятное значение имеет малая масса алюминиевых протекторов, не утяжеляющая общий вес изделия, что важно в том случае, если изделие периодически в процессе эксплуатации необходимо извлекать из водной среды на воздух.

Магний имеет самый отрицательный стационарный потенциал из всех металлов, используемых для изготовления протекторов. Вследствие этого свойства и высокой теоретической токоотдачи он особенно подходит для применения в качестве протекторов. Гидрооксид Mg(OH)₂ не проявляет склонности к образованию изолирующих поверхностных слоев даже в теплой пресной воде. Однако магний подвергается значительной собственной коррозии, скорость которой возрастает по мере увеличения содержания солей в среде. Практически токоотдача чистого магния во всех случаях несколько меньше теоретической. Она зависит от содержания загрязнений в металле протектора, вида коррозии (является ли коррозия равномерной или язвенной), плотности тока и от вида и концентрации анионов в среде. Причиной большей доли собственной коррозии является выделение водорода, образующегося по катодной параллельной реакции согласно уравнению



или же развитие свободной коррозии частиц, отделенных от протектора при сильной трещиноватости его поверхности.

Содержание железа, никеля, титана в магниевых протекторных сплавах не должно превышать 0,003% каждого, так как при более высоком их содержании свойства протекторного сплава значительно ухудшаются. Влияние меди неоднозначно, верхним пределом ее содержания в сплаве считается 0,02%. Добавка марганца повышает токоотдачу (выход по току) в хлорсодержащих средах. При этом содержание марганца должно быть не менее 0,15%. Алюминий облегчает удаление вредного железа благодаря выпадению железа вместе с марганцем, который образует железные кристаллы с оболочкой из марганца. Благодаря титану поляризуе-

мость магниевых протекторных сплавов в холодных растворах, содержащих хлориды и сульфаты, даже при больших плотностях анодного тока невелика. Оптимальный рабочий диапазон магниевых протекторов располагается при величинах pH от 9,5 до 10,5. При более низких значениях pH возрастает собственная коррозия протектора, стационарный потенциал смещается в сторону более отрицательных значений, поляризация уменьшается и происходит более равномерная коррозия поверхности протектора.

Протекторная защита сопровождается безвозвратным расходом протекторного материала. Эффективность и оптимальный срок службы защиты обеспечиваются при соблюдении следующих требований к протекторам:

- 1) потенциал протектора должен быть высокоотрицательным для сдвига потенциала защищаемой конструкции до значений, при которых скорость растворения конструкции становится пренебрежительно малой;
- 2) количество электроэнергии, излучаемой с единицы массы протектора, должно быть максимальным;
- 3) саморастворение основы сплава протектора должно быть минимальным.

Под оптимальными протекторными сплавами понимаются сплавы, являющиеся, по совокупности электрохимических характеристик, лучшими на современном уровне развития техники протекторной защиты.

В табл. 2 представлены основные технические характеристики протекторных сплавов.

Применение протекторов оказывается эффективным только при условии, что в них не содержатся значительные количества примесей металлов, имеющих более положительный электродный потенциал (свинца, железа, меди и др.), чем у протектора. Например, содержание железа в протекторных сплавах не должно превышать 0,003%. Повышение его содержания до 0,01% снижает защитное действие протектора до 73,6% от исходного. Причина этого явления в том, что указанные примеси становятся катодными участками в самом протекторе и он частично саморастворяется, не оказывая защитного действия на защищаемое изделие.

Глава III. КОНСТРУКЦИИ ПРОТЕКТОРНЫХ УСТАНОВОК И ТИПЫ ПРОТЕКТОРОВ

Разновидности конструктивного исполнения протекторных установок обусловлены требованиями, связанными с особенностями технологии изготовления и монтажа оборудования и конструкций, а также с необходимостью осуществления различных систем протекторной защиты. Конструкции установок и форма протекторов должны отвечать требованиям обеспечения оптимальных величин

сопротивления растеканию тока и зоны защитного действия (рис. 4). Размеры протекторов выбираются с учетом обеспечения требуемого срока службы его и необходимой зоны защитного действия.

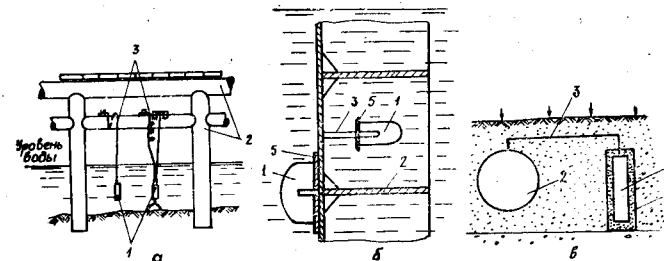


Рис. 4. Схемы протекторных установок различных типов:

а, б — схемы крепления протектора при защите металлоконструкций прибрежной эстакады нефтепромысла и обшивки подводной части затвора гидротехнического сооружения, ворот шлюза и т. п. соответственно; в — схема размещения протектора в активаторе при защите подземного трубопровода: 1 — протектор; 2 — защищаемая конструкция; 3 — соединительный проводник; 4 — активатор (сметанообразная смесь солей и глины); 5 — непроводящий экран

Протекторы изготавливаются методом литья или прессования (последний только для биметаллических прутковых протекторов).

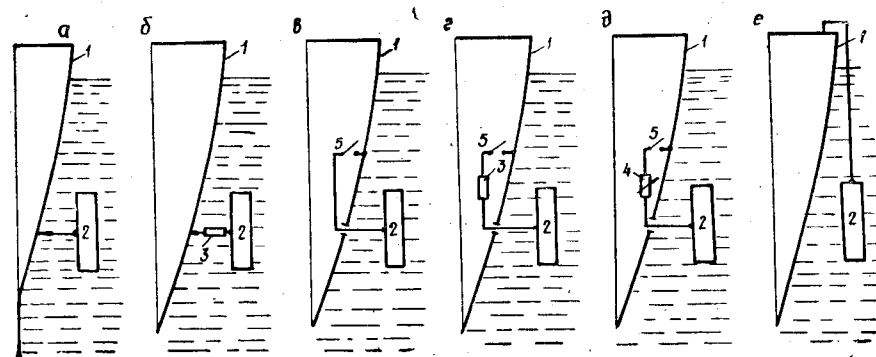


Рис. 5. Принципиальные электрические схемы систем протекторной защиты:

а — короткозамкнутая; б — неотключаемая с постоянным балластным сопротивлением; в — отключаемая с постоянным балластным сопротивлением; г — отключаемая с постоянным балластным сопротивлением; д — отключаемая с регулируемым балластным сопротивлением; е — с подвесными протекторами; 1 — защищаемое изделие; 2 — протектор; 3, 4 — постоянное и переменное балластное сопротивление; 5 — выключатель

По конструктивному исполнению протекторы делятся на следующие виды:

- 1) со стальной оцинкованной арматурой (или контактной шпилькой);
- 2) с монтажными отверстиями;
- 3) комбинированные — с арматурой и монтажными отверстиями.

По назначению систем защиты различают протекторы (рис. 5) короткозамкнутые, неотключаемые, регулируемые, отключаемые, вспомогательные (подвесные).

Защита от коррозии судов всех типов, классов и назначений, а также механического оборудования и специальных стальных конструкций гидротехнических сооружений обеспечивается путем использования 46 типов протекторов, изготавливаемых из магниевых (16), алюминиевых (23) и цинковых (7) сплавов (табл. 3).

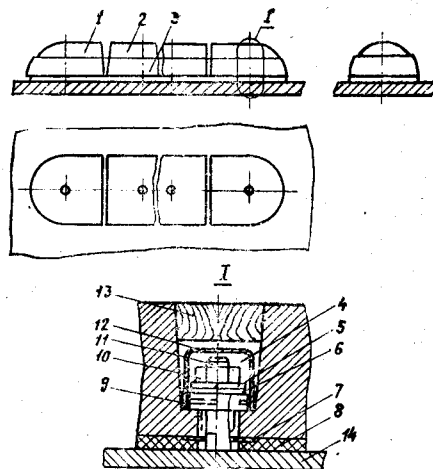
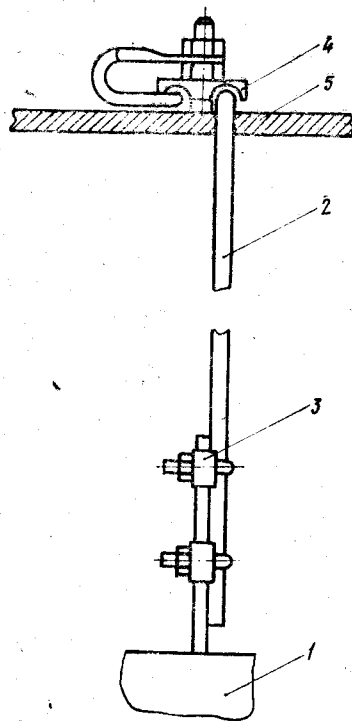


Рис. 6. Схема типового крепления подвесных протекторов типа П-ПОМ-4, П-ПОМ-10, П-ПОМ-30, П-ПОМ-60, П-ПОА-30, П-ПОА-60:

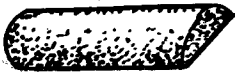
1 — протектор; 2 — контактно-крепежный стальной канат; 3 — зажим; 4 — накладная нажимная; 5 — корпус защищаемого объекта (изделия)

Рис. 7. Схема типового крепления групповых неотключаемых протекторов П-НЛМ-14, П-НКМ-6, П-НЛМ-63, П-НКМ-12:

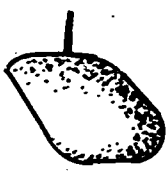
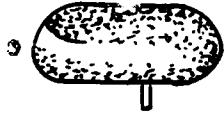
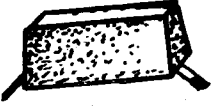
1, 2 — протекторы, соответственно, концевой и линейный; 3 — покрытие; 4 — смазка; 5, 6, 7 — шайбы, соответственно, пружинная, стальная и резиновая; 8 — прокладка резиновая; 9 — втулка изоляционная с катушкой сопротивления; 10 — гайка; 11 — шпилька; 12 — колпачок; 13 — пробка деревянная; 14 — корпус защищаемого изделия

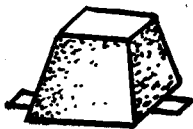
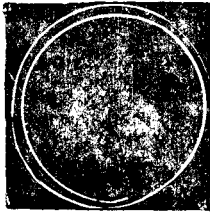
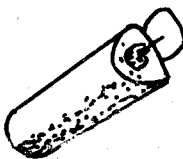
Таблица 3

Внешний вид протектора	Тип	Материал	Основные размеры, мм	Масса (покрытая), кг	Рекомендуемая область применения
	П-КОА-4	Алюминиевый сплав	250×150×40	4	Механическое оборудование и специальные стальные конструкции гидротехнических сооружений, подводная часть стальных корпусов судов мелкого и среднего водоизмещения
	П-КОЦ-10 П-КОЦ-25	Цинковый сплав	300×150×40 400×200×50	10 25	
	П-КОА-10	Алюминиевый сплав	400×200×50	10	
	П-КОМ-10	Магниевый сплав	400×200×100	10	

1	2	3	4	5	6
	П-КЛА-15	Алюминиевый сплав	500×200×50	15	Механическое оборудование и специальные стальные конструкции гидротехнических сооружений, подводная часть стальных корпусов судов малого и среднего водоизмещения
	П-НЛМ-14	Магниевый сплав	500×200×100	14	Подводная часть стальных корпусов судов малого и среднего водоизмещения
	П-НКМ-6		250×200×100	6	
	П-НКМ-12		250×300×150	12	
	П-НЛМ-63		1000×300×150	63	

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6
	П-РОМ-1 П-РОМ-3 П-РОМ-6	Магниевый сплав	160×100×50 300×150×50 500×150×50	1 3 6	Подводная часть алюминиевых и стальных корпусов судов, в том числе судов на подводных крыльях и воздушной подушке, а также судов, для которых по условиям эксплуатации необходимо периодическое отключение защиты
	П-РОА-5 П-РОА-9 П-РОА-11	Алюминиевый сплав	300×150×50 500×150×50	5 9 11	
	П-РОМ-7	Магниевый сплав	500×180×50	7	
	П-КОА-1 П-КОА-3 П-КОА-5	Алюминиевый сплав	200×50×50 200×90×90 200×115×115	1 3 5	Внутренние поверхности балластных танков, отсеков, цистерн, кингстонных и ледовых ящиков и других емкостей судов всех типов, классов и назначений
	П-КОМ-3 П-КОМ-6	Магниевый сплав	200×120×120 200×175×175	3 6	

1	2	3	4	5	6
	П-КОА-8 П-КОА-12 П-КОА-20	Алюминие- вый сплав	200×200×100 240×240×120 280×280×140	8 20 12	Внутренние поверхности балластных танков, отсеков, цистерн, кингстонных и ледовых ящиков и других емкостей судов всех типов, классов и назначений
	П-КПА-1 П-КПА-2 П-КПА-4	Алюминие- вый сплав	Ø20 Ø30 Ø40	1 2 4	Внутренние поверхности балластных танков, отсеков, цистерн, кингстонных и ледовых ящиков и других емкостей судов всех типов, классов и назначений, трубопроводов малых диаметров
	П-ПОМ-4 П-ПОМ-10 П-ПОМ-30 П-ПОМ-60	Магниевый сплав	250×115×100 600×115×100 600×195×170 600×270×240	4 10 30 60	Подводная часть алюминиевых и стальных корпусов судов стояночного флота, судов при достройке на плаву, плавучих доков, портовых плавучих кранов, различных плавучих средств, мехоборудования и специальных стальных конструкций гидротехнических сооружений

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6
	П-ПОА-30 П-ПОА-60	Алюминие- вый сплав	400×210×180 800×210×180	30 60	Портовые и другие сооружения, постоянно или периодически эксплуатирующиеся в морской воде, подводная часть корпусов судов, для которых нецелесообразно или недопустимо применение стационарных систем протекторной защиты
	П-КОЦ-18 П-КОЦ-36	Цинковый сплав	500×100×60 500×130×90	18 36	Внутренние поверхности балластируемых танков, отсеков и цистерн нефтеналивных судов, шлюзовые ворота
	П-КОЦ-20 П-КОЦ-30 П-КОЦ-50		200×200×100 240×240×120 280×280×140	20 30 50	

При креплении протекторов должна быть предусмотрена высокая надежность их механического и электрического соединения с защищаемой конструкцией. Схемы типового крепления протекторов приведены на рис. 6 и 7. Каждый тип протектора обозначается цифрой, которая указывает массу в килограммах (округленно), и четырьмя буквами: первая указывает на наименование изделия — (П), вторая — на вид протектора (К — короткозамкнутый, Р — регулируемый и т. д.), третья — на тип протектора (Л — линейный, О — одиночный и т. д.), четвертая — на марку протекторного сплава (А — алюминиевый, М — магниевый, Ц — цинковый).

Например: протектор П-КОА-4 — короткозамкнутый одиночный из алюминиевого сплава, массой 4 кг.

Глава IV. РАСЧЕТ СИСТЕМ ПРОТЕКТОРНОЙ ЗАЩИТЫ

Расчет протекторной защиты основывается на закономерностях распределения потенциала по защищаемой поверхности. В то же время распределение потенциала зависит от целого ряда факторов: формы и размеров протектора, конфигурации и размеров защищаемого изделия, состояния лакокрасочных покрытий, электропроводности воды, pH, агрессивности среды и пр.

$$\Delta\varphi = \frac{I\gamma}{2\pi\gamma^2} \left\{ 1 - \frac{\pi\gamma}{2\rho\gamma^2} \left[E_0 \left(\frac{\gamma}{\rho\gamma^2} \right) - N_0 \left(\frac{\gamma}{\rho\gamma^2} \right) \right] \right\},$$

где $\Delta\varphi$ — сдвиг потенциала защищаемой поверхности от стационарного значения (B); I — токоотдача протектора (A); γ — расстояние от центра протектора до крайней точки защищаемой поверхности (M); γ^2 — удельная электропроводность воды (см/м); ρ — удельное сопротивление лакокрасочных покрытий поверхности (Ом·м²); $E_0 \left(\frac{\gamma}{\rho\gamma^2} \right)$ и $N_0 \left(\frac{\gamma}{\rho\gamma^2} \right)$ — соответственно, функции Ломеля-Ветера и Неймана нулевого порядка.

Токоотдача определяется по формуле

$$I = \frac{\Delta E - \Delta\varphi_3}{R},$$

где ΔE — разность потенциала протектора и стационарного потенциала защищаемой поверхности (A); $\Delta\varphi$ — минимальный защитный сдвиг потенциала защищаемой поверхности; R — сопротивление растеканию тока протекторов (Ом).

Сопротивление растеканию тока протекторов рассчитывается по формуле

$$R = f_2 \left(\frac{L}{d} \right) f_3 \left(\frac{\rho\gamma}{L} \right) \frac{\ln 2L}{d \cdot \pi\gamma L},$$

где L — длина протектора (м); d — диаметр протектора (м); $f_2 \left(\frac{L}{d} \right)$ и $f_3 \left(\frac{\rho\gamma}{L} \right)$ — поправочные коэффициенты.

По величине токоотдачи протекторов определяется срок службы протекторной защиты:

$$T = \frac{S \cdot A \cdot h}{1,3 \cdot 7860},$$

где T — срок службы протектора, лет; S — масса протектора, кг; A — теоретическая токоотдача протекторного сплава, А·ч/кг; h — коэффициент полезного использования протекторного сплава; 1,3 — коэффициент, учитывающий необходимость замены протектора при износе его на 75%; 7860 — годовое количество часов.

Глава V. МОНТАЖ СИСТЕМ ПРОТЕКТОРНОЙ ЗАЩИТЫ И КОНТРОЛЬ ЕЕ РАБОТЫ

Монтаж систем протекторной защиты производится в соответствии с требованиями конструкторско-технологической документации. Перед монтажом участки защищаемого изделия, предназначенные для размещения протекторов, очищаются от окалины, ржавчины, грязи металлическими щетками, после чего окрашиваются по схеме, указанной в конструкторско-технологической документации. Окраску защищаемой конструкции производят лакокрасочными материалами, покрытия из которых устойчивы при работе протекторной защиты.

Протекторы устанавливаются строго в тех местах, которые указаны на чертеже. При установке основание протектора изолируется от защищаемой поверхности резиновыми прокладками, чем достигается более равномерное распределение плотности защитного тока.

Крепление протекторов проводится путем приваривания его «лапок» к поверхности защищаемого изделия. Для надежного контакта протектора с защищаемой поверхностью «лапки» приваривают по всему их контуру. Во избежание быстрого износа и потери надежности крепления протектора «лапки» после приваривания должны быть защищены лакокрасочным покрытием по полной схеме окраски, принятой для данной поверхности защищаемого изделия.

Для монтажа подвесных протекторов необходимы следующие комплектующие материалы:

шпильки контактные, шайбы крепежные, гайки, зажимы, накладки, кадмированные в соответствии с требованиями ОСТ 5.9048-85;

резины для изоляции протекторов марки Б, мягкая (ГОСТ 7338-77*).

При первом погружении изделий, оборудованных протекторной защитой, следует проверить распределение тока по поверхности и уточнить расположение протекторов (во избежание явления перезащиты), т. е. преждевременного разрушения лакокрасочных покрытий.

Контроль работы протекторной защиты осуществляется с помощью переносного медно-сульфатного электрода сравнения — датчика для контроля потенциала защищаемой поверхности и тока в цепи протектор — защищаемая поверхность.

При измерении потенциала электрод сравнения подсоединяется к милливольтметру с входным сопротивлением не менее 1 МОм. Контроль защитного потенциала проводится один раз в полгода. Минимальное значение защитного потенциала должно быть в пределах минус 0,75 — минус 0,85 В.

При осмотре проверяют степень износа протекторов, надежность металлического контакта с защищаемым изделием, состояние лакокрасочных покрытий. Замена протекторов производится при износе их более чем на 75% по массе.

Глава VI. ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОТЕКТОРНОЙ ЗАЩИТЫ

Обычно электрохимическая защита является наиболее эффективной в тех случаях, когда защищаемые изделия должны быть сохранены в работоспособном состоянии в течение многих лет. Ориентировочные затраты на устройство протекторной защиты для металлических конструкций, не имеющих защитных покрытий, принимаются в размере 0,8—1,0% строительной стоимости защищаемого объекта, а если защищаемые поверхности имеют защитные покрытия, то соответствующие затраты составят 0,1—0,2% строительной стоимости объекта.

В некоторых случаях благодаря протекторной защите удается сохранить старые сооружения, которые иначе пришлось бы обновлять или заменять новыми вследствие коррозионных повреждений (образование раковин, сквозных коррозионных трещин, сквозной или язвенной коррозии и т. д.). В отдельных случаях протекторная защита вообще впервые сделала возможной эксплуатацию некоторых установок в подводных и подземных средах.

Преимущества протекторной защиты в настоящее время общепризнаны. Ее широко применяют в новых областях. Особенно существенные преимущества обеспечиваются в следующих областях:

1. На стальных конструкциях в морской и речной воде, а также в грунтах нередко наблюдается коррозия в виде раковин и язв (сквозная). В среднем скорость коррозии стальных конструкций в глинистом грунте составляет 0,2 мм/год, а в более кислых болотистых грунтах — 0,26÷0,3 мм/год. Скорость коррозии в морской воде — 0,3÷0,35 мм/год, в речной — 0,2÷0,3 мм/год.

При больших площадях защищаемой поверхности наибольшая скорость проникновения коррозии может быть и существенно более высокой. Язвенная и сквозная коррозия особенно легко вызывает повреждения у резервуаров, трубопроводов, водоподогревателей, конструкций гидротехнических сооружений, корпусов речных и морских судов, буев, понтонов, поскольку эти изделия при прорыве стенок теряют свою работоспособность.

2. Для компенсации потерь металла от коррозии нередко требуется увеличение толщины стенок конструкции (для обеспечения запаса по толщине), что обуславливает ощутимый перерасход металла, однако толщину стенок трубопроводов и других металлоконструкций можно не увеличивать, если обеспечена надежная защита от коррозии. Благодаря этому можно сэкономить значительное количество металла; в случае трубопроводов это может соответствовать уменьшению толщины стенки в пределах 10—12%. В результате уменьшается не только стоимость сооружения, но и его масса, что упрощает прокладку трубопроводов и снижает затраты на транспортировку при больших расстояниях, например при перевозках морским транспортом.

3. Некоторые конструкции, в том числе резервуары, баки и т. п., могут быть изготовлены из низколегированных сталей повышенной прочности, если благодаря протекторной защите будет обеспечена их достаточная коррозионная стойкость. Без протекторной защиты для них потребовалось бы применить коррозионно-стойкие высоколегированные стали или сплавы, которые обычно имеют менее благоприятные механические свойства. Области применения протекторной защиты здесь могут быть: теплообменники, трубопроводы для холодной морской и речной воды, турбины, механическое оборудование и специальные стальные конструкции гидротехнических сооружений, резервуары-хранилища для химических продуктов и пр.

Современный уровень развития протекторной защиты позволяет повысить рентабельность вышеперечисленных изделий и сооружений за счет:

увеличения длительности действия защиты от коррозии, а следовательно, и срока их эксплуатации в целом;

значительного уменьшения материальных и денежных средств, трудоемкости, длительности выполнения работ по защите оборудования и конструкций от коррозии;

полного исключения весьма трудоемких и не всегда технологичных очистных, грунтовочных покрасочных работ на внутренних поверхностях трубопроводов, облицовок, баков, емкостей, а также на имеющих сложную конфигурацию поверхностях механического оборудования и специальных стальных конструкций гидротехнических и других сооружений.

В настоящее время около 20% механического оборудования и специальных стальных конструкций гидротехнических сооружений, а также более трети всех отечественных морских и речных судов различных типов, классов и назначений имеют протекторную защиту поверхности своих конструкций. Срок службы систем протекторной защиты механического оборудования и специальных стальных конструкций гидротехнических сооружений составляет, как правило, 12—15 лет и связан с условиями среды, в которой происходит эксплуатация объекта.

Сравнительная стоимость защиты механического оборудования и специальных стальных конструкций гидротехнических сооружений от коррозии (в ценах первого полугодия 1993 г.) представлена в табл. 4.

Таблица 4

Наименование материалов для защиты от коррозии	Стоимость защиты 1 т изделия, руб.	Срок службы защиты, лет	Удельные затраты на год эксплуатации, руб/т	Примечания
Материалы:				
эпоксидные	65525	10	6553	Требуются пескоструйная очистка поверхности металла, обеспыливание, обезжиривание, грунтовка, окраска
перхлорвиниловые	27872	5	5574	
Металлизация:				То же
алюминием	80117	18	4451	
цинком	134138	18	7452	Не требуется
Протекторная защита	57408	15	3827	

Экономический эффект от внедрения и использования протекторной защиты только для механического оборудования и специальных стальных конструкций гидротехнических сооружений в условиях Минтопэнерго Российской Федерации составит порядка 1 млрд. руб.

Разработчиком элементов и систем протекторной защиты механического оборудования и специальных стальных конструкций гидротехнических сооружений является Государственный ордена Трудового Красного Знамени трест по проектированию, изготовлению и монтажу гидромеханического оборудования «Гидромонтаж» Минтопэнерго РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эванс Ю. Коррозия и окисление металлов. М.: Машиностроение, 1962.
2. Красноярский В. В., Ларионов А. К. Подземная коррозия металлов. М.: Машиностроение, 1962.
3. Красноярский В. В., Френкель Г. Я., Носов Р. П. Коррозия и защита металлоконструкций гидротехнических сооружений. М.: Госэнергоиздат, 1963.
4. Френкель Г. Я. Протекторная защита подводной части стальных корпусов судов малого и среднего водонизмещения. М.: Машиностроение, 1967.
5. Красноярский В. В., Френкель Г. Я., Носов Р. П. Коррозия и защита металлов/Учебник для техникумов. М.: Металлургия, 1969.
6. Френкель Г. Я. Защита от коррозии механического оборудования и металлоконструкций гидротехнических сооружений: РУ 34031782 Минэнерго СССР/М.: Гидропроект, 1983.
7. ГОСТ 26251-84. Протекторы для защиты от коррозии. Технические условия (СТ СЭВ 4046-83). М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1984.
8. Коррозия и защита судов/Под ред. Е. Я. Люблинского. Справочник. Л.: Судостроение, 1987.
9. Моделирующие устройства для решения теории поля/Под ред. Л. И. Гутенмахера/пер. с англ. Изд. иностр. лит., 1982.
10. Рекомендации по защите от коррозии и обрастания оборудования и металлических конструкций гидросооружений. Л.: ВНИИГ, 1982.
11. Защита подземных металлических сооружений от коррозии/И. В. Стрижевский и др./Справочник. М.: Стройиздат, 1990.
12. Коррозия и борьба с ней/Под ред. А. М. Сухотина пер. с англ. Л.: Химия, 1989.
13. Жук Н. П. Курс коррозии и защиты металлов. М.: Металлургия, 1968.
14. Розенфельд И. Л. Коррозия и защита металлов. М.: Металлургия, 1970.
15. Скорчеллетти В. В. Теоретическая электрохимия. Л.: Химия, 1970.
16. Томашев Н. Д., Матвеева Т. К. Коррозия металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1965.
17. Улиг Г. Коррозия металлов. М.: Металлургия, 1968.
18. Тодт Ф. Коррозия и защита от коррозии (в 2-х томах). М.: Химия, 1966—1967.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	3
Глава I. Механизм действия, параметры электрохимической защиты и явление защитного эффекта	6
Глава II. Материалы, используемые в системах протекторной защиты	10
Глава III. Конструкции протекторных установок и типы протекторов	16
Глава IV. Расчет систем протекторной защиты	24
Глава V. Монтаж систем протекторной защиты и контроль ее работы	25
Глава VI. Целесообразность и эффективность применения протектор- ной защиты	26
Список литературы	29

Григорий Яковлевич ФРЕНКЕЛЬ

**Протекторная защита от коррозии механического
оборудования и специальных стальных конструкций
гидротехнических сооружений**

Редактор Л. М. Дмитриева.
Технический редактор З. В. Погорелова.
График Т. С. Пронина.

Сдано в набор 29.09.93 г. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага № 2.
Печать высокая. Печ. л. 2. Тираж 1000 экз. Заказ 216. Свободная цена.

Типография института «Гидропроект».
128812, ГСП, Москва А-80, Волоколамское шоссе, д. 2.