

Приведены краткие сведения по рассматриваемым разделам теории электрохимических методов защиты от коррозии. Даны описания лабораторных опытов, предназначенных для самостоятельного выполнения студентами I курса всех факультетов университета.

ДАНИЛОВСКАЯ

Лора Петровна

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА СУДОВ ОТ КОРРОЗИИ И ОБРАСТАНИЯ

Методические указания к лабораторной работе

© СПбГМТУ,  
1999

Ответственный редактор д-р техн. наук, проф. А.А.Хоникевич  
Редактор Н.Ф.Сухина

---

Подписано в печать 02.12.99. Зак.1448. Тир.200. Уч.-изд. л. 1,7  
Издательский центр СПбГМТУ, Лоцманская, 10

## I. ОБЩИЙ ПРИНЦИП ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Электрохимические методы защиты от коррозии основаны на изменении значений стационарного потенциала<sup>ж)</sup> металлической конструкции. Как следует из опытных данных, приведенных на рис. I, при смещении потенциала металла в отрицательную сторону от стационарного значения  $\varphi_{\text{стац}}$  и при достижении защитного потенциала  $\varphi_{\text{защ}}$  наблюдается резкое снижение скорости коррозии. Например, при обеспечении защитного сдвига потенциала  $\Delta\varphi_{\text{защ}}$ , равного 100 мВ, скорость коррозии углеродистой стали в морской воде изменяется от  $v_k = 0,1$  мм/год до  $v_3 = 0,02$  мм/год, т.е. уменьшается в пять раз.

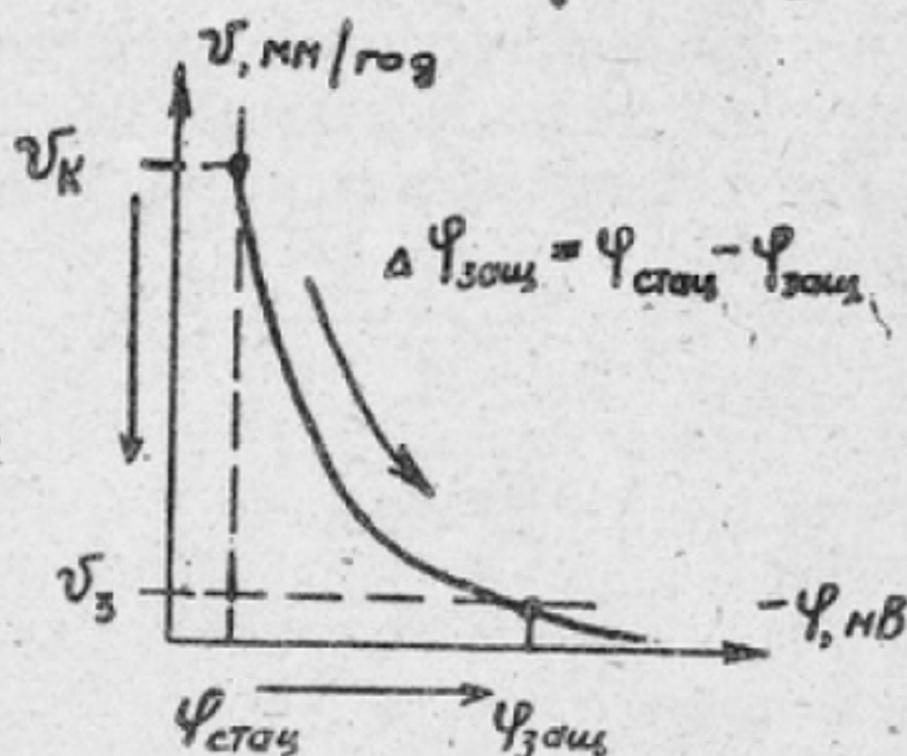


Рис. I. Уменьшение скорости коррозии стали  $v_k$  при смещении ее стационарного потенциала  $\varphi_{\text{стац}}$  в отрицательную сторону

На практике такое снижение скорости коррозии оказывается часто вполне достаточным, чтобы существенно продлить срок службы изделия или сооружения (см. пример опыта 4, разд. 6).

<sup>ж)</sup> Стационарным потенциалом металла называется устойчивое во времени значение необратимого электродного потенциала металла. Такой потенциал не подчиняется уравнению Нернста и может быть определен только опытным путем.

Сдвиг потенциала в отрицательную сторону и поддержание защитного потенциала конструкции могут быть осуществлены двумя путями:

- созданием контактной пары, т.е. подключением к конструкции более активного металла - анодного протектора (протекторная защита);

- подключением к конструкции отрицательной клеммы внешнего источника постоянного тока (катодная защита).

Обоснование выбора электрохимической защиты произведено на стадии проектирования с учетом всех сопутствующих факторов.

## 2. ПРОТЕКТОРНАЯ ЗАЩИТА

Этот способ защиты от коррозии основан на действии коррозионного элемента, который создается двумя электродами: протектором (от лат. *protector* - защитник) и конструкцией, защищаемой от коррозии.

Рассмотрим в качестве примера схему коррозионного элемента, возникающего при защите от коррозии корпуса судна из углеродистой стали путем подключения к нему протектора из цинкового сплава (рис.2).

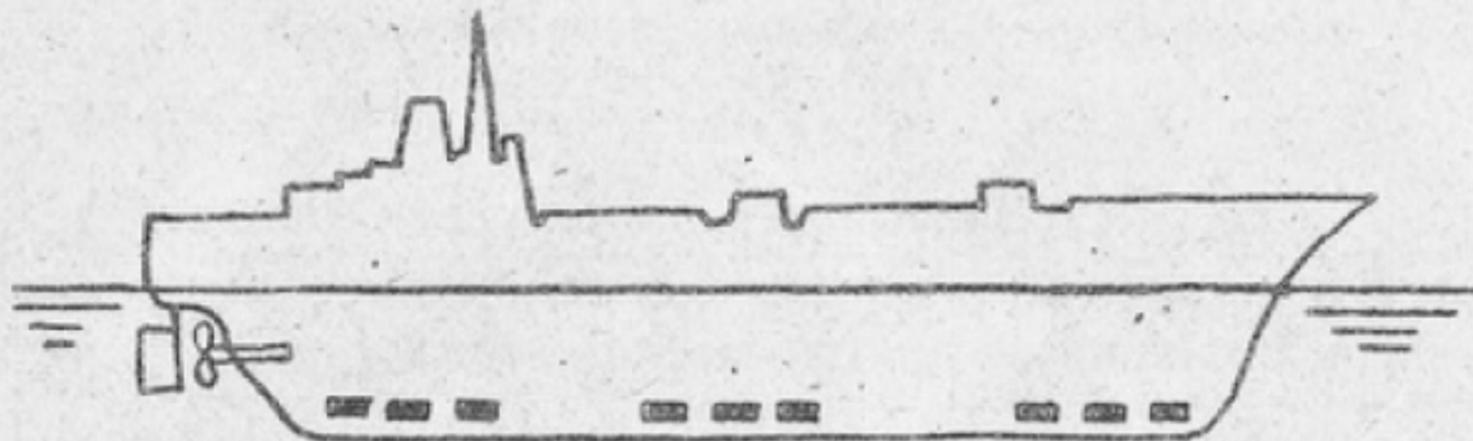
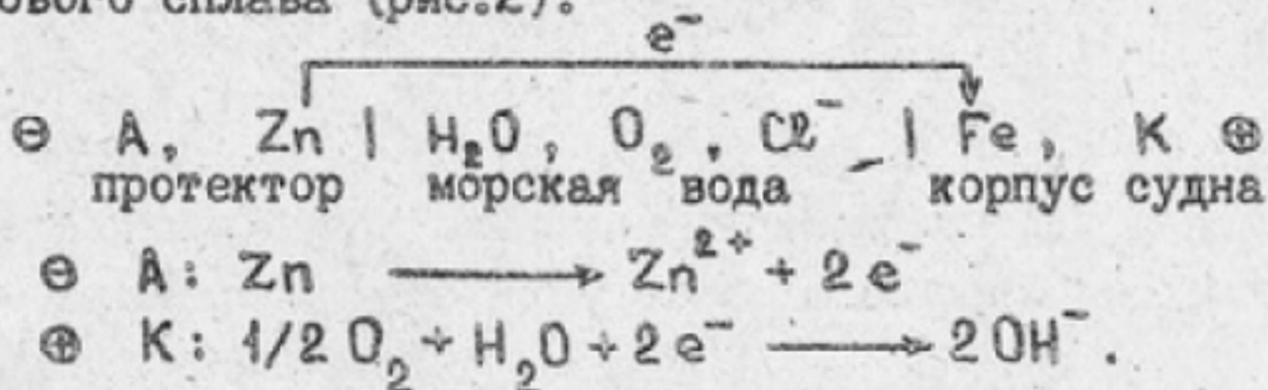


Рис.2. Группы протекторов на подводной части корпуса судна

Как видно, в этом элементе протектор является анодом, поэтому за счет перехода ионов металла в морскую воду масса протектора постепенно уменьшается. Корпус судна является катодом, на нем, в основном, протекают реакции восстановления окислителей  $O_2$  и  $H_2O$ . Таким образом, в результате контакта углеродистой стали с протектором скорость ее коррозии существенно замедляется. Это происходит за счет ускорения растворения протектора:

В качестве протектора могут быть использованы сплавы, потенциал которых более отрицателен, чем потенциал защищаемой конструкции:  $\varphi_{пр} < \varphi_{констр}$ . В судостроении используются специальные протекторные сплавы на основе  $Mg, Al, Zn$  (табл. I), имеющие стабильный во времени рабочий потенциал  $\varphi_{пр}$ , достаточный для обеспечения защитного потенциала конструкций из медных и алюминиевых сплавов, стали и других металлов.

Таблица I

## Характеристика протекторных сплавов

Марка сплава	Основной металл сплава	Рабочий потенциал $\varphi_{пр}$ , мВ	Токоотдача $Q$ , А·ч/кг	КПИ, %
МПИ	Mg	-1240	2200	65
АПИ	Al	-730	2880	85
ЦПИ	Zn	-760	820	95

Протекторные сплавы должны иметь также высокую токоотдачу  $Q$ , которая характеризует количество электричества (А·ч), образующееся при растворении единицы массы протектора. Высокие величины коэффициента полезного использования (КПИ) достигаются за счет снижения бесполезного саморастворения сплавов  $J_c$ . Это удается путем ограничения содержания в сплавах примесей катодных металлов. Например, при содержании в магниевом протекторе примеси железа более 0,003% резко увеличивается его саморастворение, так как железо образует катодные участки в самом протекторе и он растворяется, не оказывая защитного действия на основную конструкцию. КПИ протектора и общий ток, стекающий с протектора  $J_{об}$ , определяются по формулам:

$$J_{об} = J_3 + J_c; \quad КПИ = \frac{J_3}{J_{об}} 100\%$$

где  $I_3$  — полезный защитный ток в цепи протектор — защищаемая конструкция;  $I_c$  — бесполезный ток саморастворения протектора, протекающий между анодными и катодными участками его поверхности.

Протектор (рис.3) может иметь вид бруска, усеченной пирамиды, полусферы и др. Для подводной части корпуса судна форма протектора должна быть такой, чтобы протектор не снижал обтекаемость корпуса. Схема типового крепления короткозамкнутого протектора приведена на рис.4. Как видно, в основании находится вплавленный стальной сердечник, — необходимый для приварки протектора к защищаемой конструкции.

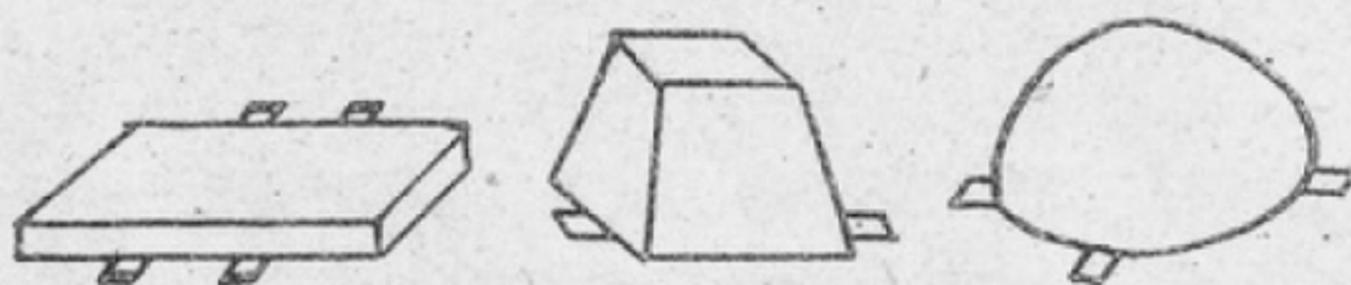


Рис.3. Некоторые из возможных форм протекторов

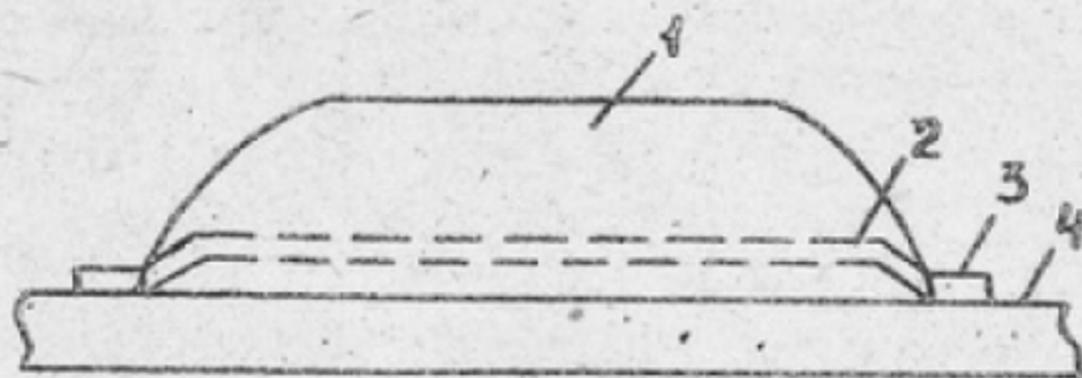


Рис.4. Типовое крепление короткозамкнутого протектора: 1 — протектор; 2 — стальной сердечник; 3 — место сварки; 4 — защищаемая конструкция

Масса протекторов, выпускаемых отечественной промышленностью, составляет 2–60 кг. Выбор массы устанавливаемого протектора производят, исходя из задаваемого срока службы протекторной защиты, который может быть любым, например, от 2 до 20 лет. Для судовых конструкций задаваемый срок службы протекторной защиты составляет обычно 3–4 года, что приблизительно соответствует междудоковому периоду эксплуатации судна.

Эффективное действие протектора ограничено определенной площадью, или зоной защитного действия (рис.5). Расстояние

от протектора, на котором обеспечивается защитный потенциал и необходимая степень защиты металла от коррозии, называется радиусом защитного действия  $R_{з.д.}$  протектора. Эта величина зависит от рабочего потенциала протектора, его массы, а также от удельной электропроводности коррозионной среды. С понижением солености коррозионной среды от  $35^{\circ}/\text{оо}$  (для морской воды среднеокеанского состава) до  $1^{\circ}/\text{оо}$  (для речной воды) удельная электропроводность ее уменьшается приблизительно в 10 раз. Это вызывает резкое снижение радиуса защитного действия протектора. Поэтому на судах, эксплуатирующихся во внутренних бассейнах с соленостью воды менее  $18^{\circ}/\text{оо}$  (Балтийское, Каспийское, Черное моря), а также на судах смешанного плавания "река - море", применяются протекторы только из магниевых сплавов ( $\varphi_{пр} = -1,28$ ). Протекторы из алюминиевых сплавов в этих условиях неэффективны, так как имеют слишком малый  $R_{з.д.}$  Однако они успешно используются на судах неограниченного района плавания, где соленость морской воды составляет около  $35^{\circ}/\text{оо}$ .

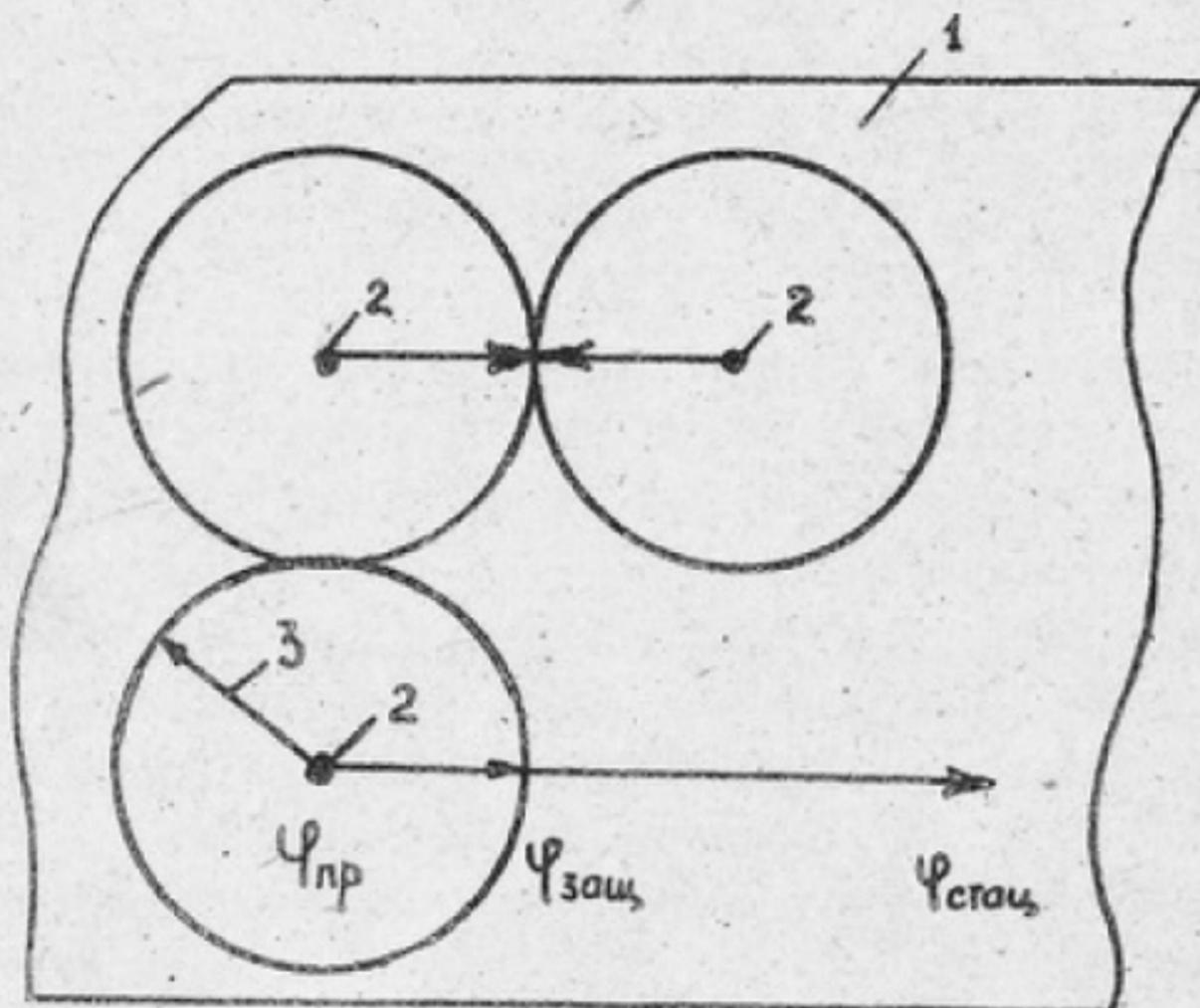


Рис.5. Схема размещения протекторов: 1 - поверхность конструкции, защищаемой от коррозии; 2 - протекторы; 3 - радиус защитного действия протектора

Число протекторов (см.рис.5), устанавливаемых на защищаемой от коррозии металлической поверхности, рассчитывается

таким образом, чтобы зоны защитного действия соседних протекторов соприкасались или перекрывались. Количество  $N$  и массу протекторов, необходимых для защиты подводной части корпуса, выбирают с учетом водоизмещения  $D$  судов, для которых они предназначены (рис.6). Протекторы размещают в пределах скулового пояса, равномерно по длине корпуса и симметрично с каждого борта (см.рис.2).

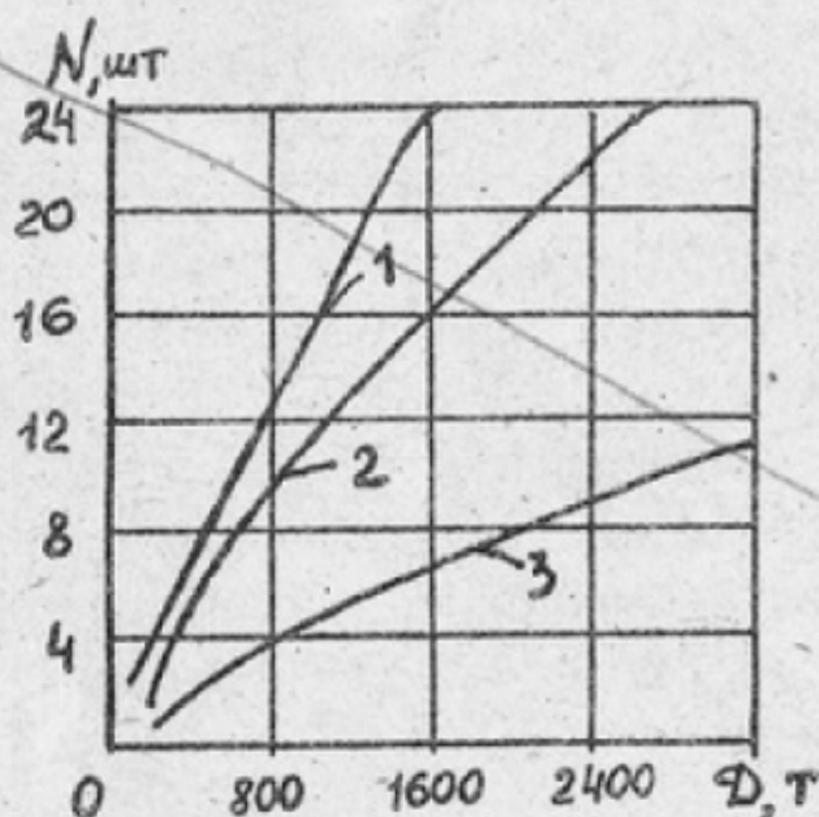


Рис.6. Количество протекторов из алюминиевого сплава (на один борт) для стальных судов неограниченного района плавания водоизмещением  $D$  до 3 тыс.т

Преимущества протекторной защиты перед другими методами защиты от коррозии заключаются в надежности и простоте монтажа протекторов, отсутствии необходимости обслуживания в процессе эксплуатации.

Недостатки этой защиты связаны с ограниченным сроком службы из-за износа и растворения дефицитных протекторных сплавов, необходимостью повторного монтажа протекторов. Имеются сложности с регулировкой параметров защиты — защитного тока и потенциала, уменьшением радиуса защитного действия во времени.

Протекторная защита неэффективна в подкисленных коррозионных средах (при  $pH < 7$ ), что связано с интенсивным саморастворением протекторов.

Протекторная защита широко применяется для защиты от общей и язвенной коррозии следующих конструкций:

— подводной части корпуса судна (см.рис.2), в том числе

и для защиты кормового подзора от коррозии, вызванной действием контактной пары гребной винт - корпус судна (рис.7);

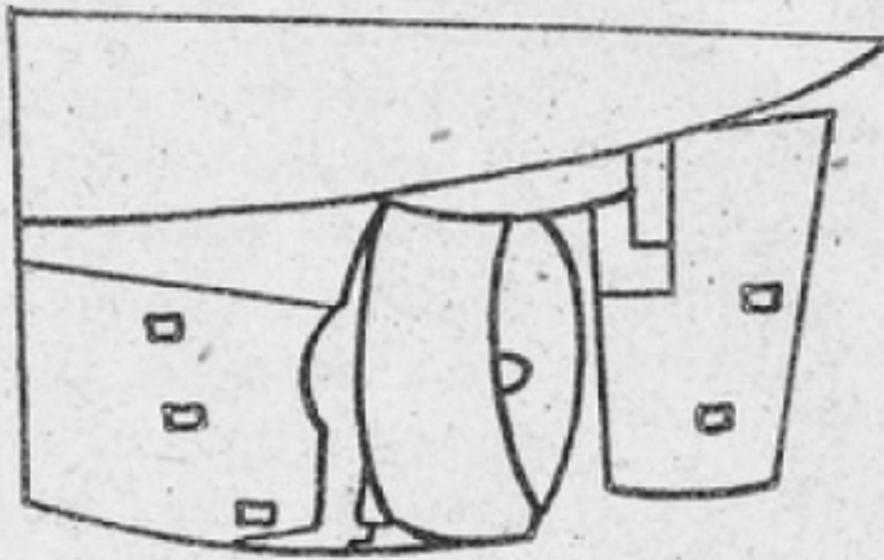


Рис.7. Протекторы в кормовом подзоре судна.

- наружной поверхности подземных резервуаров, трубопроводов, а также кабелей связи (рис.8);

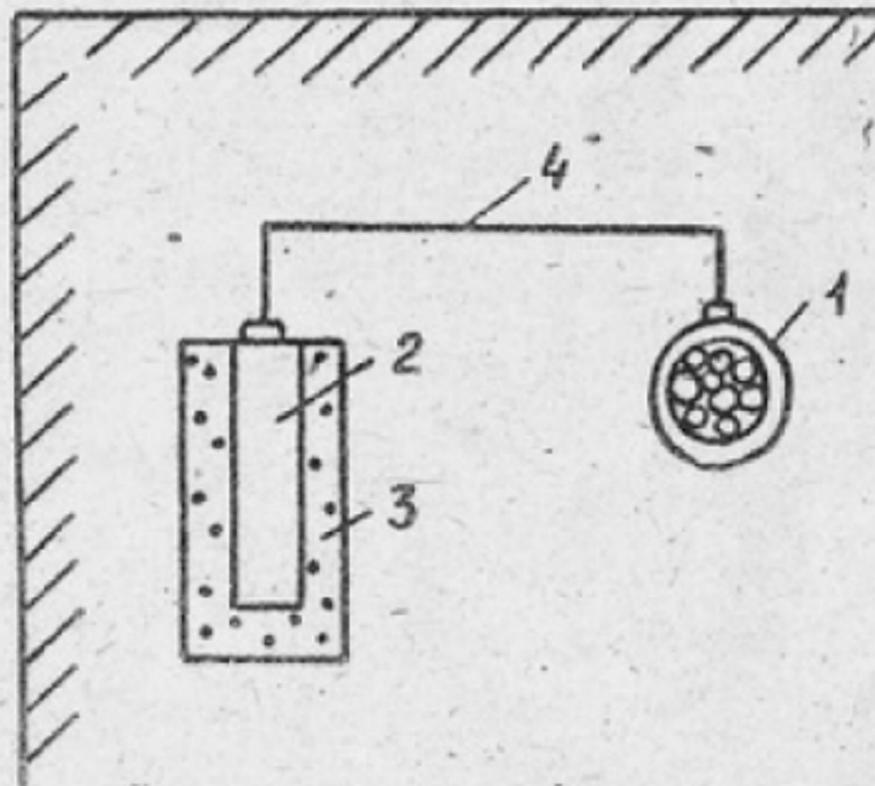


Рис.8. Протекторная защита оболочки подземного кабеля связи: 1 - кабель; 2 - протектор; 3 - засыпка; 4 - соединительный провод

- внутренней поверхности стенок и днища балластных танков судов (рис.9,а);

- внутренней поверхности днищевой части нефтерезервуаров, а также грузовых танков нефтеналивных судов. В этих емкостях под слоем обводненной нефти на днище происходит отстой подтоварной воды, содержащей растворенные соли и газы:  $O_2$ ,  $CO_2$  или  $H_2S$  (рис.9,б).

В танках нефтеналивных судов присутствуют смеси паров нефтепродуктов и воздуха, способные воспламеняться от искры, возникающей при случайном ударе оборвавшегося протектора о сталь.

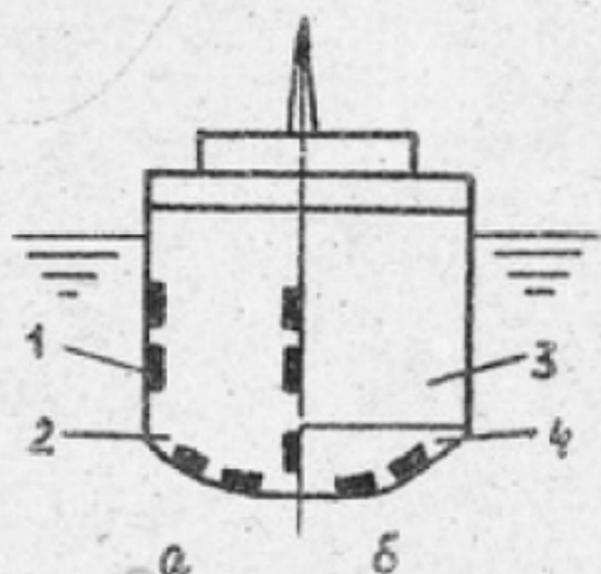


Рис. 9. Протекторная защита балластных танков (а), а также грузовых танков нефтеналивных судов (б): 1 - протектор; 2 - морская вода (балласт); 3 - обводненная нефть; 4 - подтоварная вода

В связи с этим в танках категорически запрещается применять протекторы из магниевых сплавов. Использование алюминиевых сплавов допускается при энергии возможного удара протектора не более 275 Дж. Цинковые сплавы безопасны и могут применяться в любых пожаро-, взрывоопасных помещениях. Так, например, протектор из цинкового сплава массой 36 кг имеет зону защитного действия около  $24 \text{ м}^2$  и обеспечивает

защиту от коррозии набора днища танка в течение 8 лет.

Кроме рассмотренных выше конструкций, протекторы используются для снижения скорости контактной коррозии в потоке морской воды (до 4 м/с) элементов судовых систем: трубопроводов, арматуры, конденсаторов, гидравлической части насосов и др. Например, кольцевой протектор, установленный в трубопроводе между сопряженными фланцами, может иметь радиус защитного действия, равный 8-10 внутренним диаметрам трубы, и срок службы до 6 лет.

Разновидностью протекторной защиты являются протектирующие элементы, применяющиеся для защиты гребных винтов. Они имеют различную конфигурацию (полукольца, серменты и др.), кре-

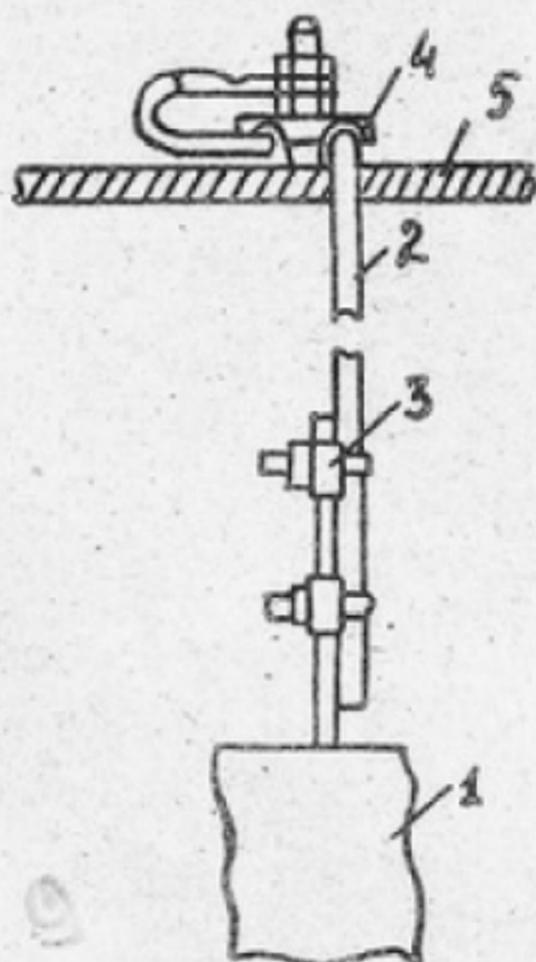


Рис. 10. Типовое крепление подвешенного протектора: 1 - протектор; 2 - контактно-крепительный канат; 3 - зажим; 4 - накладка нажимная; 5 - корпус судна

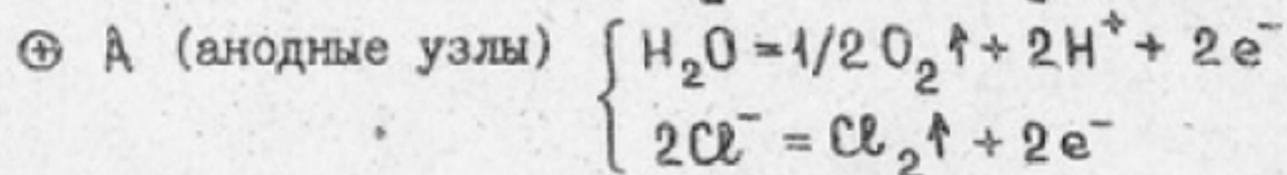
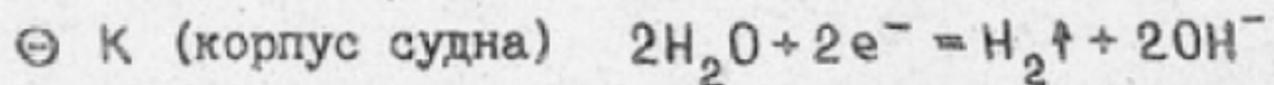
пятся на кромках гребного винта и сохраняют гидродинамические характеристики последнего.

Защита от коррозии подводной части стационарных сооружений портовых плавдоков, плавкранов, судов при достройке или ремонте на плаву осуществляется одиночными подвесными протекторами из магниевых или алюминиевых сплавов. Схема типового крепления такого протектора приведена на рис. 10.

### 3. КАТОДНАЯ ЗАЩИТА ОТ ВНЕШНЕГО ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Второй метод электрохимической защиты от коррозии основан на законах электролиза, используемого как с нерастворимым, так и с растворимым анодами.

Для снижения скорости коррозии корпусов морских судов применяют станции катодной защиты типа "Луга". Схема защиты включает в себя источник питания 1, распределительный щит 2, анодные узлы с околоанодными экранами 3, электроды сравнения 4, силовые и контрольные кабели 5 (рис. II). Постоянный ток от клеммы  $\oplus$  источника питания по кабелю поступает на анодные узлы, а далее через морскую воду и дефекты лакокрасочного покрытия попадает на корпус судна. Корпус соединен кабелем с клеммой  $\ominus$  источника питания и является при электролизе катодом. На катоде и анодных узлах в морской воде протекают реакции:



При монтаже катодной защиты исходят из того, что на участках корпуса, наиболее удаленных от анодного узла, должен обеспечиваться минимальный защитный сдвиг потенциала  $\Delta\varphi_{30\text{мВ}} = 100 \text{ мВ}$ . Плотность тока, необходимая при этом, зависит от состояния лакокрасочного покрытия, которое с течением времени становится менее эффективным из-за его механического разрушения или старения. Кроме того, плотность защитного тока зависит от солености воды в случае перехода судна из одного моря в другое. Поэтому для судов неограничен-

ного района плавания нашли применение источники питания с автоматическим режимом поддержания защитного потенциала путем регулировки защитного тока на корпусе. Датчиком управления работой источника питания служит хлорсеребряный электрод сравнения, установленный на корпусе для контроля величины потенциала.

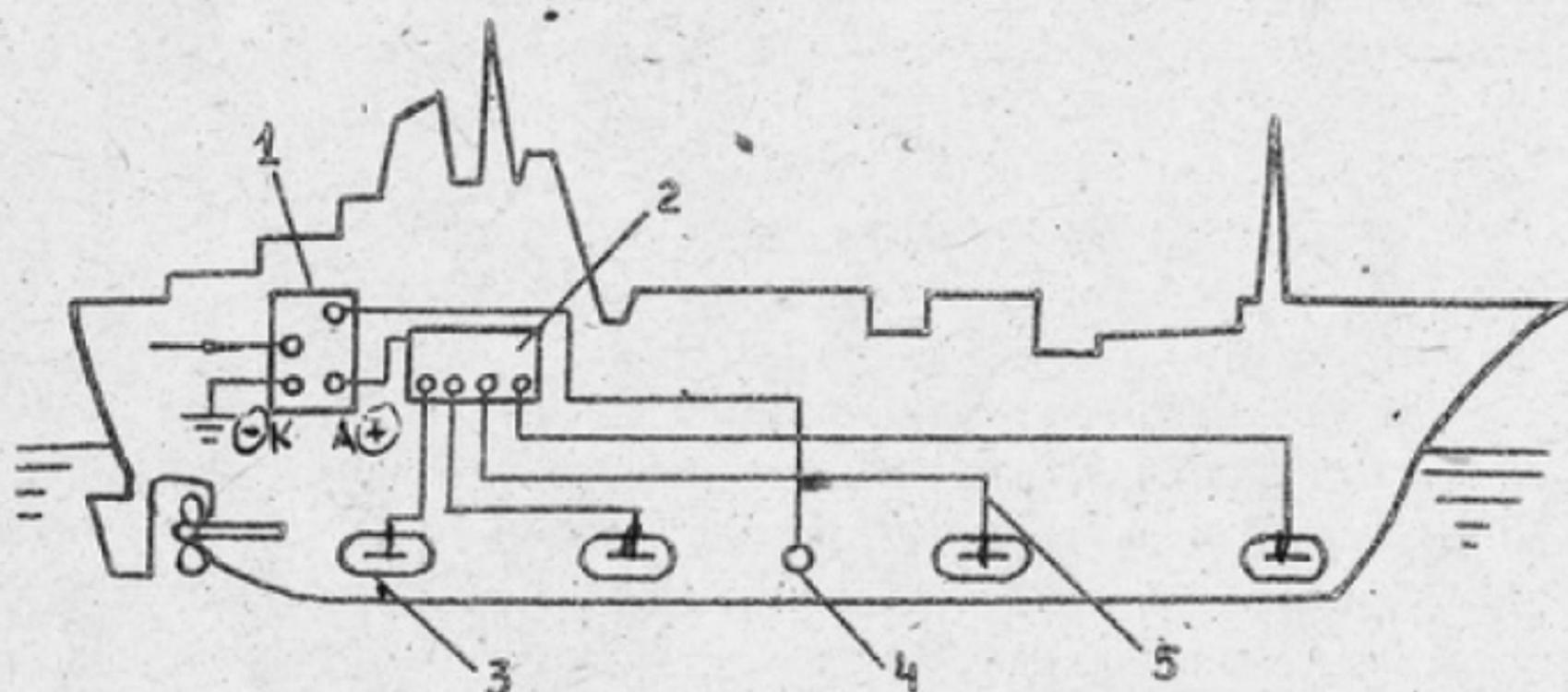


Рис. II. Принципиальная схема катодной защиты корпуса судна

Основными элементами катодной защиты являются аноды, которые должны иметь большую зону защитного действия достаточный срок службы. Для того, чтобы удовлетворить этим требованиям, аноды должны допускать протекание тока очень высокой плотности. При этом они должны иметь небольшую скорость саморастворения, что важно для сокращения непроизводительных потерь металла анода.

Для подводной части корпусов морских судов замена анодов практически весьма трудоемка, и срок службы их должен быть сопоставим со сроком службы судна. Для этих условий лучшими являются биметаллические аноды из платины и титана или платины и ниобия. Толщина платиновой фольги в них составляет около 50 мкм (рис. I2). Аноды выполняют в виде узкой полосы шириной до 10 мм, утепленной в изоляционный материал. Последний должен быть стойким к воздействию газов  $O_2$  и  $Cl_2$ , выделяющихся на платине. Околоанодный экран из стеклопластика размером 2-3 м<sup>2</sup> (см. рис. II, I2) обеспечивает более равномерное распределение тока по поверхности корпуса судна и пред-

охраняет лакокрасочные покрытия у края анода от разрушения выделяющимся водородом.

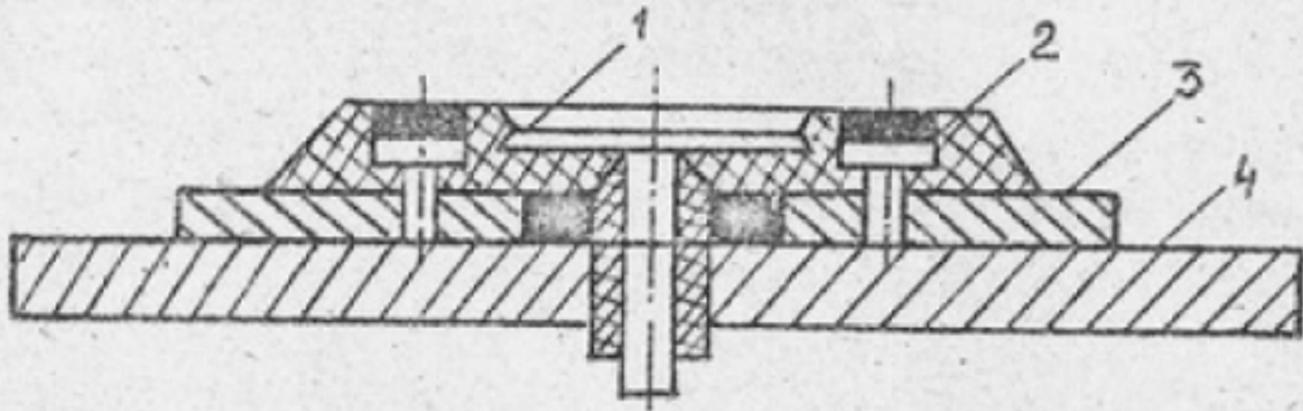


Рис. 12. Конструкция типового анодного узла: 1 - анод; 2 - анодная основа; 3 - околоанодный экран из стеклопластика; 4 - корпус судна

При правильной эксплуатации катодная защита в течение длительного времени обеспечивает высокую эффективность и надежность подавления коррозии обшивки корпуса судов из углеродистой и нержавеющей стали, алюминиевых сплавов. Защита не требует возобновления в течение всего срока эксплуатации судна. Кроме того, достоинствами катодной защиты являются:

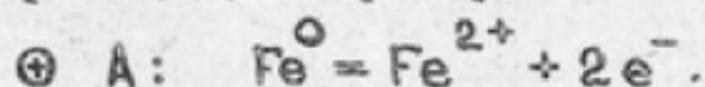
- возможность регулировки защитного тока и потенциала, а также автоматизации поддержания их значений;
- снижение расхода топлива и обрастания морскими организмами обшивки корпуса судна вследствие уменьшения шероховатости ее поверхности за счет выделения на ней пузырьков воздуха.

К недостаткам катодной защиты следует отнести высокую начальную стоимость, значительную трудоемкость монтажных работ, необходимость обслуживания системы в период эксплуатации судна, использование драгоценных металлов - платины и др. Однако затраты, связанные с осуществлением и эксплуатацией катодной защиты, окупаются менее чем за один год.

Катодную защиту наиболее выгодно применять на средних и крупнотоннажных судах водоизмещением свыше 5-20 тыс. т. При этом ее стоимость уже через 3-4 года эксплуатации сравнима со стоимостью протекторной защиты. Защита от коррозии судов с меньшим водоизмещением осуществляется с помощью протекторов.

Для защиты от коррозии прибрежных металлоконструкций (рис. 13) аноды устанавливают в коррозионной среде на некотором удалении от объекта, например, на дне или на определенной глубине акватории в районе стоянки судов или сооружений. Известно также применение подвесных анодов цилиндрической фор-

мы. На судах, стоящих на консервации или достройке на плаву, аноды подвешивают на стальных оцинкованных или капроновых канатах на глубине 5–7 м ниже днища. Аноды распределяют равномерно по длине корпуса и симметрично по обоим бортам. Замена анодов в рассмотренных случаях не представляет особых трудностей. Такие аноды могут быть изготовлены из более доступных материалов, чем платина, например, из ферросилида, графита. Удельный расход анодов из этих материалов существенно выше, чем у платины, и при плотности тока  $100\text{--}200\text{ А/м}^2$  составляет  $10\text{--}20\text{ мм/год}$ . Принципиально возможны аноды из железных и алюминиевых сплавов (так называемые растворимые аноды), но они имеют очень высокую скорость анодного растворения по реакции, например:



Поэтому эти материалы не имеют широкого распространения. Кроме того, следует иметь в виду, что в этом случае происходит загрязнение окружающей среды (воды, грунта) ионами  $\text{Fe}^{2+}$ . ПДК по этому иону в воде составляет  $0,5\text{ мг/л}$ .

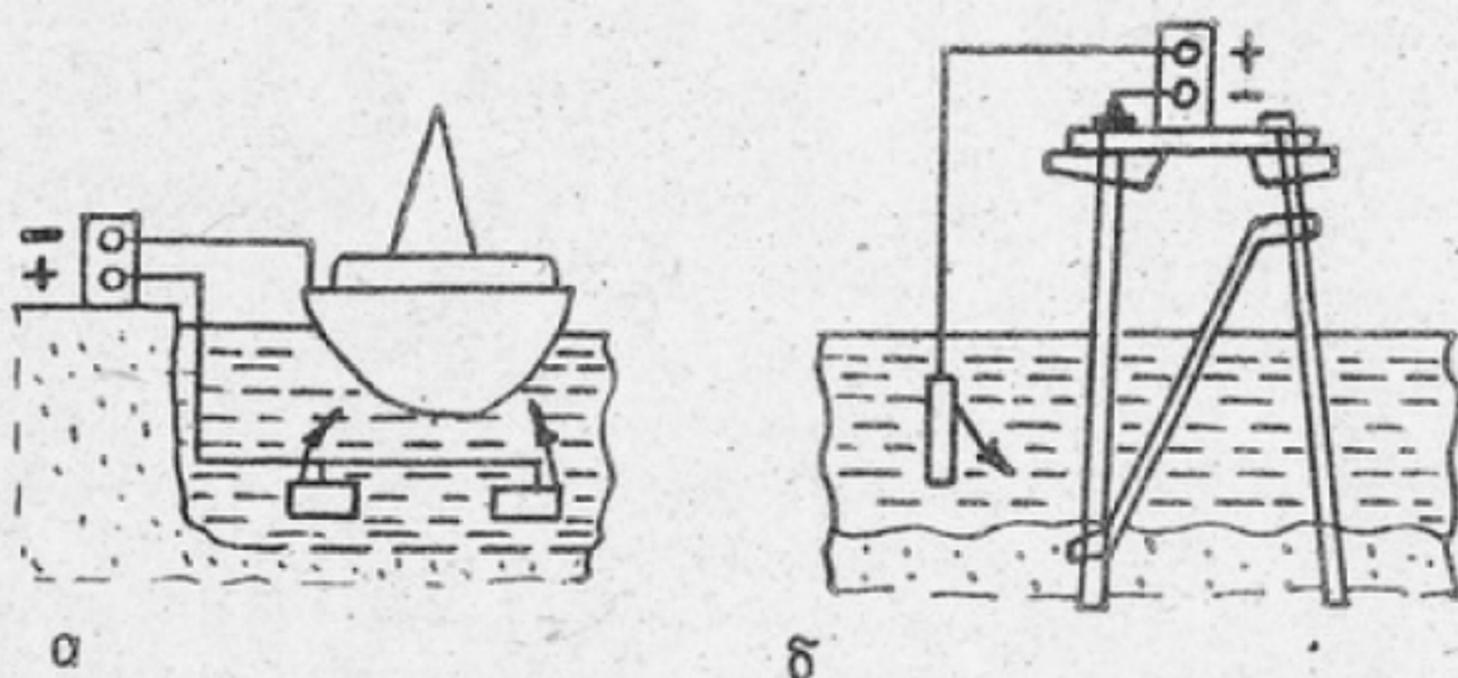


Рис. 13. Схема береговой катодной защиты для судов на стоянке (а) и свай морской эстакады (б)

Катодная защита широко используется с целью снижения скорости коррозии. Другими многочисленными объектами могут быть:

- обшивка корпуса судна при его достройке или ремонте на плаву;
- перо руля, а также валопровод и гребной винт, замы-

подготовки поверхности металла. Это означает, что защите подлежат поверхности с уже имеющимися начальными очагами коррозии. Однако эффективность электрохимических методов защиты существенно повышается, когда поверхность покрыта высококачественным защитным лакокрасочным покрытием с высоким удельным сопротивлением. Так, защитная плотность тока на поверхности углеродистой стали без покрытия составляет  $100-200 \text{ мА/м}^2$ , а для окрашенной поверхности приблизительно в 5 раз меньше, т.е. около  $30 \text{ мА/м}^2$ . Расход протекторов для защиты от коррозии стали при отсутствии покрытия увеличивается в 2-3 раза. С другой стороны, использование электрохимической защиты позволяет уменьшить объем продуктов коррозии, образовавшихся на поверхности металла. В связи с этим существенно замедляется процесс отслаивания и разрушения лакокрасочного покрытия, повышается срок его службы. Наибольший экономический эффект достигается при использовании комплексных методов защиты металлов от коррозии. Общий эффект при этом выше арифметической суммы эффектов индивидуальных методов таких, как катодная и протекторная защиты, лакокрасочные покрытия.

#### 4. ЗАЩИТА ОТ ЭЛЕКТРОКОРРОЗИИ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ

Электрохимическая защита успешно применяется как один из методов борьбы с электрокоррозией, вызванной действием блуждающих токов. Блуждающие токи — это токи, ответвляющиеся от своего пути в электропроводящей среде. Источниками блуждающих токов могут быть установки для электросварки или электролиза, линии электрифицированного железнодорожного транспорта, заземления постоянного тока и другие электрические установки. Возникновение блуждающего тока от трамвайной линии показано на рис. 14. Электрический ток поступает от клеммы  $\oplus$  через контактный провод по рельсам к клемме  $\ominus$  генератора. Вследствие плохого контакта рельсов на стыках и недостаточной изоляции их от почвы часть тока выходит в почву. Встречая на своем пути металлические сооружения (например, подземные газо- и водопроводы), блуждающие токи ответвляются в них, так как сопротивление последних значительно меньше сопротивления почвы. При этом в местах входа блуж-

каемые на корпус судна с помощью контактно-щеточного устройства;

- плавучие доки, платформы морских буровых установок, сваи морских эстакад (например, поселок Нефтяные Камни в Каспийском море);

- стенки причалов, затворов плотин, шлюзовые ворота и другие металлоконструкции гидротехнических сооружений, эксплуатирующихся в пресной воде;

- трубы подземных водо-, газо-, нефтепроводов, подземные резервуары и любые другие конструкции, вблизи которых имеются источники электроэнергии<sup>\*)</sup>.

Катодную защиту запрещается использовать для различных замкнутых объемов - цистерн, резервуаров, танков судов и т.д. Это вызвано тем, что на анодах очень медленно, но образуются агрессивные окислители -  $O_2$  и  $Cl_2$ . Постепенное накопление этих газов в ограниченных объемах может способствовать не замедлению коррозии, а наоборот, ускорению ее.

С помощью катодной защиты невозможно предотвратить коррозию металлической поверхности, находящейся выше ватерлинии. Это относится к таким полупогруженным конструкциям, как корпус судна, свая морской эстакады. Нетрудно представить, что пропускаемый электрический ток протекает только через поверхность металла, контактирующую с электролитом, но не с воздухом.

Необходимо учитывать также, что защитная плотность тока и, следовательно, подавление коррозионных процессов не могут быть достигнуты на электрически экранируемых поверхностях. Например, внутренняя поверхность трубок водяных конденсаторов интенсивно корродирует, даже если сам корпус конденсатора и наружная поверхность трубок достаточно защищена от коррозии с помощью электрохимических методов.

Особенности катодной защиты конструкций, эксплуатирующихся в пресной воде, изложены в разд. 6 при описании опыта 5.

Важным достоинством катодной защиты (так же, как и протекторной) является отсутствие жестких требований к чистоте

<sup>\*)</sup> В последнее время в мировой практике в качестве источников питания используют термоэлектрогенераторы и ветроэлектрогенераторы, что позволяет расширить область применения катодной защиты.

дающих токов в трубу образуются участки катодной поляризации (зона К), а в местах выхода токов — анодные участки (зона А), на которых труба сильно корродирует. Если труба защищена неметаллическим покрытием, то все блуждающие токи выходят только через дефекты в покрытии трубы. Это вызывает увеличение плотности тока на ограниченных участках поверхности и резко ускоряет язвенное коррозионное разрушение трубы.

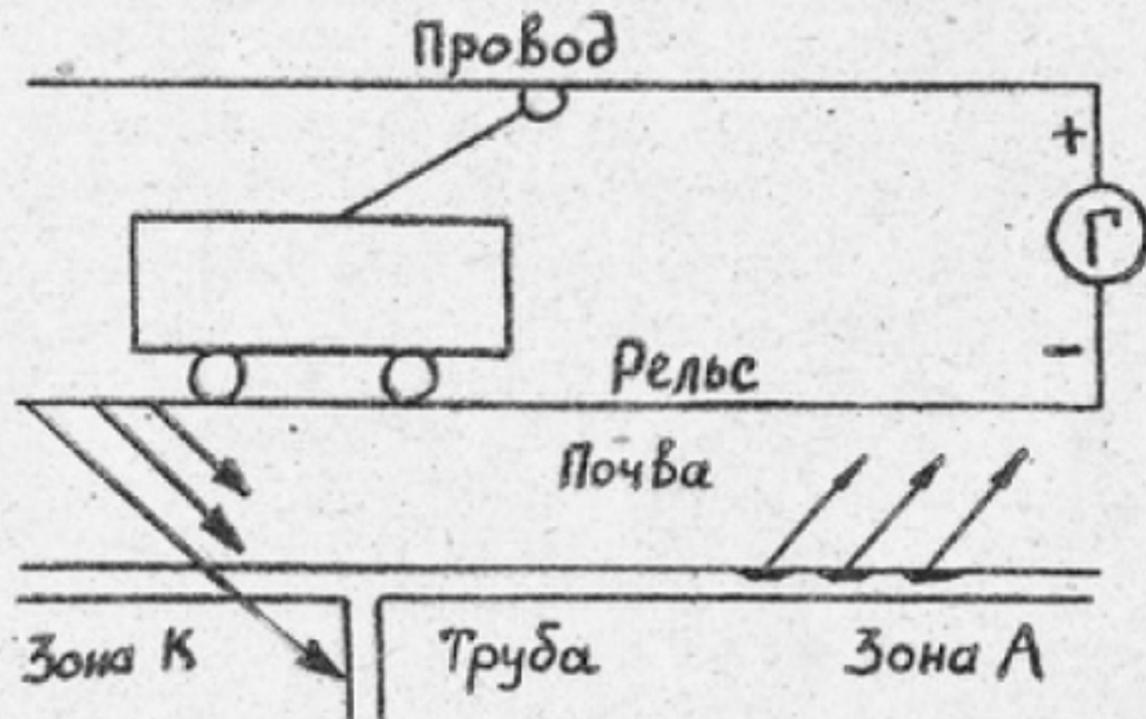


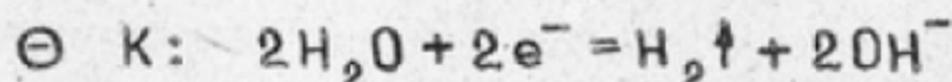
Рис. 14. Коррозия подземной трубы по действию блуждающих токов

Для стали скорость электрокоррозии  $K_{эл}$  (мм/год) определяется зависимостью:

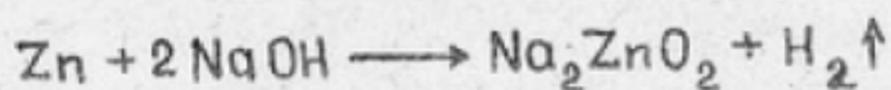
$$K_{эл} = 1,14 i_a,$$

где  $i_a$  — плотность анодного (блуждающего) тока на поверхности стали. Например, при  $i_a = 5 \text{ A/m}^2$  скорость растворения металла трубы составляет около 6 мм/год, что почти в 100 раз выше естественной скорости коррозии в почве.

Известно, что амфотерные металлы (Pb, Al, Sn, Zn и др.), образуя растворимые соединения, быстро корродируют и в кислотах, и в щелочах. Поэтому изделия из амфотерных металлов разрушаются не только на анодных участках, но и на катодных, где в результате реакции:

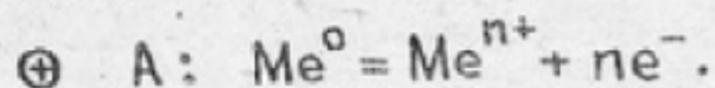


может накапливаться щелочь. В ней и растворяется амфотерный металл:

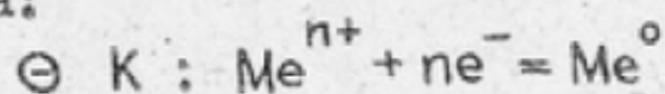


Таким образом, блуждающие токи могут нанести серьезный ущерб металлическим сооружениям, причем радиус зоны действия этих токов достигает иногда нескольких десятков километров.

При поляризации переменным блуждающим током интенсивность электрокоррозии значительно меньше, чем при постоянном токе, и не представляет существенной опасности для морских и подземных сооружений. Это объясняется тем, что под действием переменного тока в анодный полупериод ионы металла переходят в электролит по реакции:



В течение катодного периода большая часть этих ионов перемещается в обратном направлении — восстанавливается на поверхности металла:



Одновременно за счет восстановления  $\text{H}_2\text{O}$  может выделяться и некоторое количество водорода.

Электрокоррозию блуждающими токами можно устранить, если на поверхность металлоконструкции нанести надежное изоляционное покрытие без дефектов.

Другой способ состоит в том, чтобы соединить конструкцию, например, трубу (см. рис. 14) и рельсы, металлическим проводником с низким сопротивлением. По нему блуждающий ток может отводиться к клемме  $\ominus$  генератора. Такой способ называется электродренажем. В тех случаях, когда устройство дренажей и нанесение покрытия невозможны или экономически неоправданы, используют электрохимическую защиту. Например, вдоль рельсов (см. рис. 14) закапывают аноды из чугуна, которые соединяют с трубой медными проводниками. Тогда блуждающие токи вызывают коррозию только этих анодов. Замена их обходится достаточно дешево. Такая протекторная защита применяется только в случае незначительных влияний блуждающих токов, когда эти токи могут быть скомпенсированы током протекторной установки при достижении защитного потенциала. Если же дополнительного анода недостаточно для существенного

замедления электрокоррозии, то используют катодную защиту. При этом в цепь между анодом и трубой включают источник постоянного тока, и ток защиты течет в направлении, противоположном блуждающим токам.

Для защиты судов, достраиваемых или ремонтирующихся на плаву и находящихся в зоне действия блуждающих токов (так же, как и для подземных сооружений), используется дренирование тока электрокоррозии (рис. 15). В большинстве случаев, когда суда оборудованы штатными системами катодной или протекторной защиты, одновременно с общей коррозией подавляется также и электрокоррозия. Поэтому дренажные провода на таких судах допускается не устанавливать. Однако, если мощность систем электрохимической защиты недостаточна (например, в акватории с пресной водой), дополнительно к штатной системе следует применять подвесные протекторы или использовать системы катодной защиты типа "Берег" с подвесными анодами.

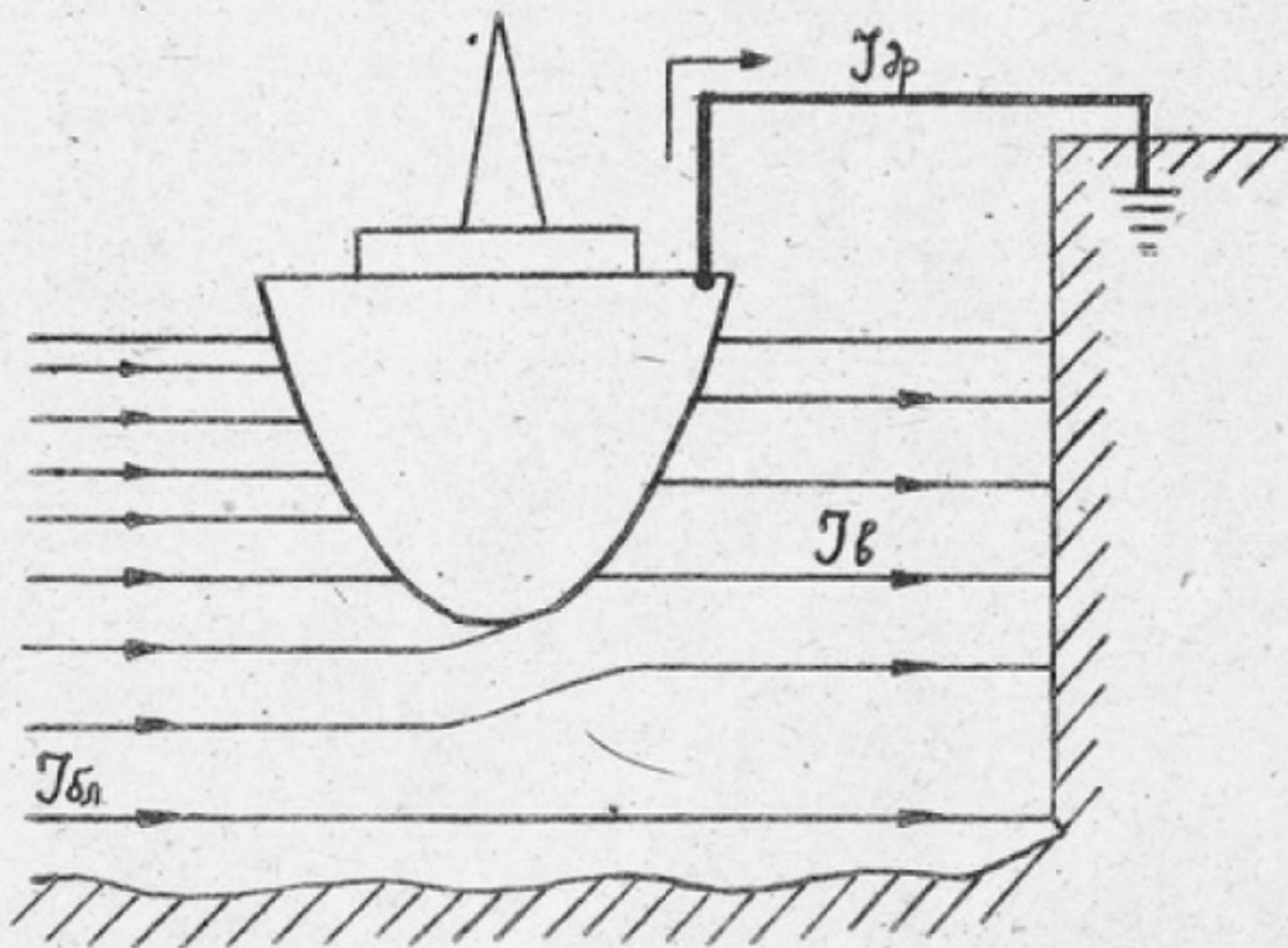


Рис. 15. Схема защитного действия дренажного провода:  $I_{бл}$  — блуждающий ток;  $I_{в}$  — ток, стекающий с корпуса судна в воду;  $I_{др}$  — ток в дренажном проводе.

Необходимо учитывать, что суда с системой катодной защиты являются сами источниками блуждающих токов (рис. 16).

Поэтому они опасны для других близко расположенных судов, не имеющих электрохимической защиты. Такие суда должны электрически соединяться с судами, оборудованными защитой, с помощью кабелей сечением не менее  $95 \text{ мм}^2$ . В случае отсутствия такого электрического контакта между судами расстояние между их бортами должно быть не менее 5 м.

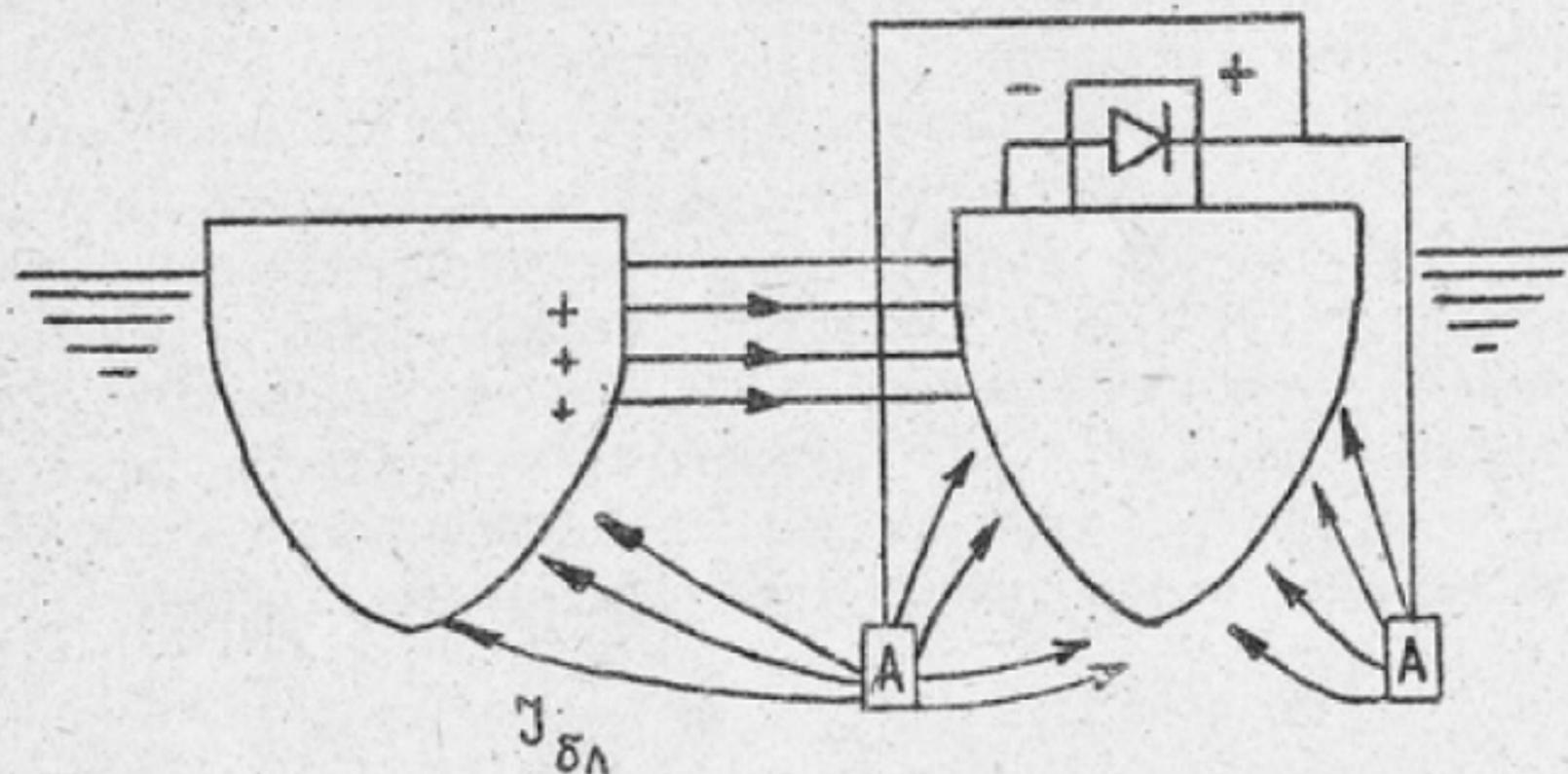


Рис. 16. Электрокоррозия судна при работе системы катодной защиты на рядом стоящих судах

## 5. ЗАЩИТА ОТ ОБРАСТАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ

Эффективность функционирования гидротехнических сооружений и плавательных средств, особенно морских судов, резко снижается из-за обрастания их подводной части. Под обрастанием на практике подразумевают сообщество водных организмов, живущих в прикрепленном к поверхности состоянии. Из известных трехсот видов организмов-обрастателей наиболее опасен взрослый баянус, крепкая известковая раковина которого прочно сцепляется с поверхностью металла. Баянус характеризуется быстрым ростом (6–12 мес.) и длительным (до 30 суток) выживанием в неблагоприятных условиях – при обескислороживании, опреснении, осушении. К опасным видам обрастателей относятся также мидии, мшанки, полихеты и некоторые другие животные и растительные организмы.

Интенсивность обрастания в умеренных широтах может составить от нескольких граммов до 4–12 кг/м<sup>2</sup> поверхности металла за год. В тропических широтах масса обрастателей гораздо больше – до 30 кг/м<sup>2</sup> за 7–8 месяцев. Наибольшему обрастанию у морских судов подвержены подводная часть корпуса (особенно корма), гребные винты, системы забортной воды – трубопроводы, теплообменники, арматура.

На интенсивность обрастания влияют такие факторы, как географическая зона, район и глубина эксплуатации судна, соленость и температура, а также скорость потока и режим движения морской воды. Наиболее сильнодействующим фактором является скорость потока морской воды в интервале 0,05–0,35 м/с.

Конструкционные стали, легкие сплавы, пластмассы обрастают более интенсивно по сравнению с медными сплавами.

Обрастание, если с ним не бороться, вызывает уменьшение скорости судна, например, в зависимости от условий эксплуатации на 0,3–1,0 узлов через полгода и на 1,0–3,5 узла через 2 года. При этом для поддержания проектной скорости до 15 узлов мощность энергетической установки должна быть увеличена на 50–100%, что приводит к существенному перерасходу топлива. Другим негативным последствием обрастания является увеличение сопротивления теплообмену различных материалов теплопередающих поверхностей.

Методы борьбы с обрастанием, включая очистку поверхности от обрастания и рациональное конструирование, связаны, главным образом, с защитой от обрастания, т.е. с его предотвращением.

Защита от обрастания в зависимости от возможности регулирования защитного эффекта может быть осуществлена двумя способами:

- пассивным, включающим в себя токсичные металлические или лакокрасочные покрытия;
- активным, включающим в себя действие ультразвука, электрического и магнитного полей или токсических химических веществ.

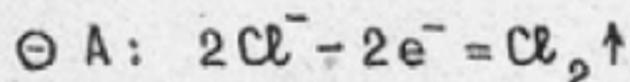
В случае, когда применяемое токсическое вещество получено не в промышленных условиях, а непосредственно на объекте защиты или вблизи него, используемый способ защиты называется физико-химическим.

Лакокрасочные необрастающие покрытия, наиболее широко

применяемые на судах до последнего времени, имеют существенные недостатки:

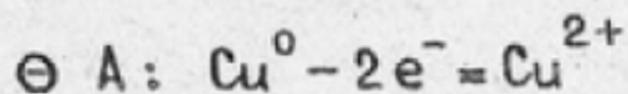
- малый срок службы, не превышающий двух лет;
- низкий КПД, обусловленный тем, что часть токсинов (ионов  $Cu^{2+}$ ,  $Hg^{2+}$ ,  $As^{3+}$  и др.) расходуется непроизводительно при воздействии высоких скоростей морской воды, когда защита не требуется;
- малая эффективность токсинов против растительных организмов - водорослей;
- уменьшение численности биофильтратов (обеспечивающих самоочищение водоемов) из-за действия токсинов, вымываемых водой.

Указанных недостатков (кроме последнего) лишен физико-химический способ защиты от обрастания, позволяющий достичь неограниченного срока службы защиты и создать регулируемую по интенсивности автоматическую защиту. В этом новом способе противообрастающими токсинами являются газообразный хлор ( $Cl_2$ ) или ионы меди ( $Cu^{2+}$ ), растворенные в морской воде, омывающей поверхность защищаемой конструкции. Указанные токсины получают в результате электролиза, проводимого в морской воде, причем хлор выделяется в электролизере на нерастворимом платино-титановом аноде:



(даже возможно образование гипохлорита натрия  $NaOCl$ ).

Другой токсин - ионы меди - образуется в морской воде при электролизе с растворимым медным анодом:



Концентрации токсинов, при которых в морской воде проявляется их сильный антиобрастательный эффект, называются защитными. Они составляют 1-1,5 г/м<sup>3</sup> для хлора и 0,25-0,30 г/м<sup>3</sup> для ионов меди.

На ряде судов для борьбы с обрастанием подводной части корпуса используется система защиты с автономным электролизером (рис. 17, а). При этом электролизер 5 работает в самостоятельной гидравлической системе, обеспечивает получение концентрированного раствора активного хлора (200-500 г/м<sup>3</sup>), разбавление его в смесителе 7 и подачу раствора с помощью насоса 9 на поверхность защищаемого объекта 10.

На циркуляционных трассах плавучих буровых установок и различных судов успешно применяется защита ионами меди. В этих случаях целесообразно применение электролизера, расположенного на пути потока морской воды и называемого поэтому путевым (рис. 17, б). При этом концентрация токсичного реагента, полученного в электролизере, соответствует защитной дозе. Длительность обработки воды ионами меди составляет 2-4 ч/сутки при оптимальной плотности тока 10-200 А/м<sup>2</sup>. Срок службы электролизера составляет 10 лет при замене медных электродов через каждые 1-3 года.

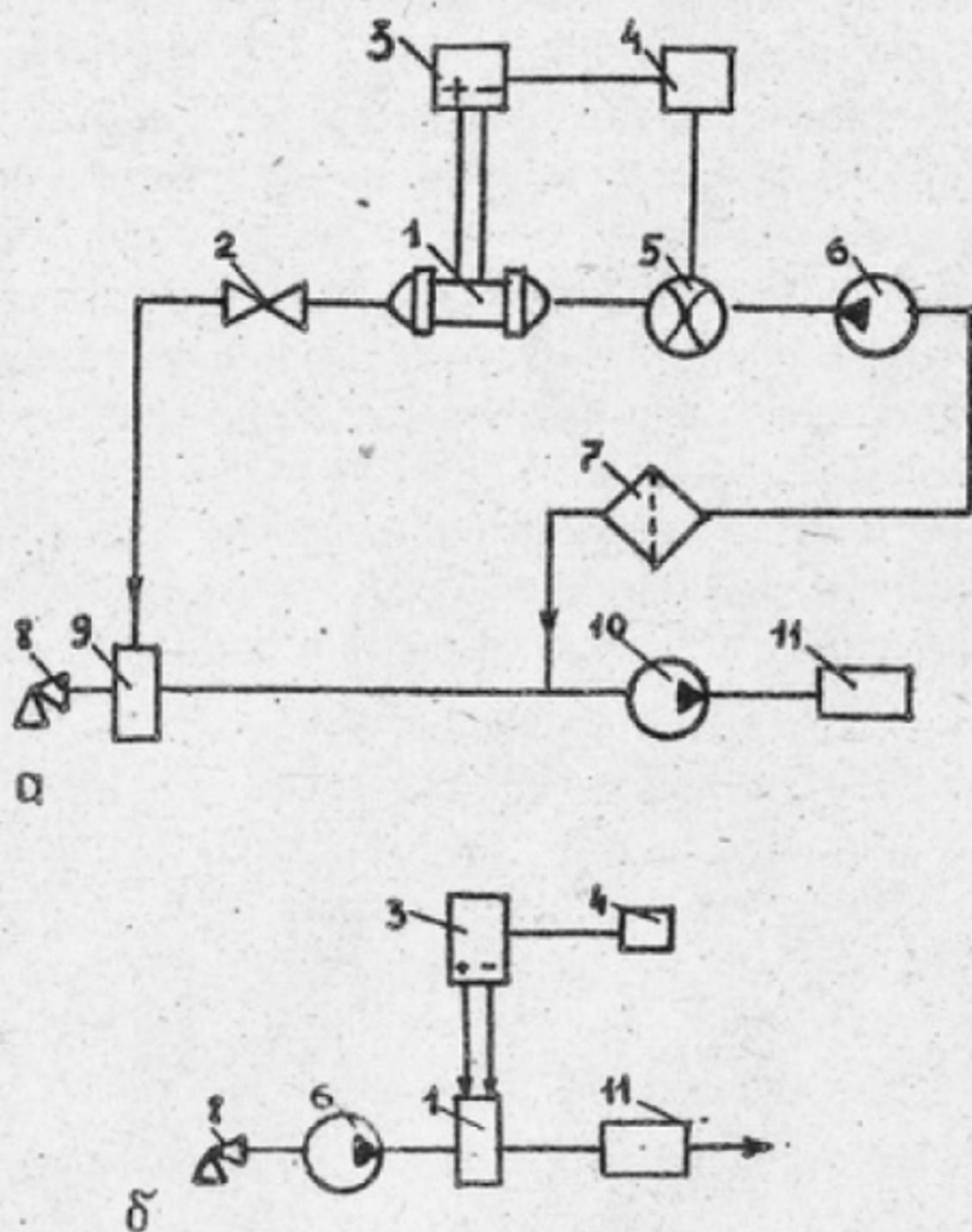


Рис. 17. Схемы систем защиты с автономным (а) и путевым (б) электролизерами: 1 - электролизер; 2 - вентиль; 3 - источник питания; 4 - блок управления; 5 - расходомер; 6 - насос электролизера; 7 - фильтр; 8 - кингстон; 9 - распределитель; 10 - насос защищаемой системы; II - объект защиты

На судах элементы физико-химической защиты: электролизер, источник постоянного тока, насос и др. - устанавливаются в процессе электромеханомонтажных работ.

Рациональное использование рассмотренного способа защиты от обрастания поверхности металла позволяет повысить надежность и эксплуатационные качества судов, а также увеличить междоковый период их эксплуатации.

## 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Опыт 1. Протекторная защита стали.

В три пробирки налить на 1/4 объема морскую воду (или 3%-ный раствор  $\text{NaCl}$ ) и добавить по 2-3 капли раствора красной кровяной соли ( $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ ). В первую пробирку осторожно опустить стальной прут. Во вторую и третью пробирки - стальные прутки в контакте с образцами из алюминия и магния соответственно.

Объяснить причины изменения окраски индикатора, а также появления пузырьков газа. Составить схемы коррозионных элементов. Написать уравнения реакций, протекающих на электродах этих элементов.

Можно ли использовать протекторы из алюминиевых и магниевых сплавов для защиты от коррозии герметичных стальных емкостей?

Опыт 2. Протекторная защита меди.

В два стакана налить до 1/2 объема морскую воду и добавить по 2-3 капли раствора  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ . В один стакан поместить медную пластинку и стальной образец так, чтобы они не касались друг друга, а в другой стакан - медную пластинку в контакте со сталью. Сопоставить интенсивность окраски индикатора. Объяснить наблюдаемые явления.

Опыт 3. Определение радиуса защитного действия протектора.

Стальные стержни с привинченными к торцам цинковыми протекторами зачистить наждачной бумагой, промыть водой и тщательно вытереть. Шесть кювет (или цилиндров) заполнить растворами  $\text{NaCl}$ , концентрации которых в промилле (S, ‰ или г/кг) составляют: 0,01; 1; 8; 15; 35; 300. Добавить в каждую емкость по 1 мл раствора  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ . Погрузить стержни с протекторами в кюветы с растворами. Наблюдать за появлением первого синего пятна на стальных стержнях.

На каждом стержне измерить с помощью линейки расстояние от протектора до первого появившегося очага коррозии. Записать полученные данные в виде таблицы. Построить график зависимости радиуса защитного действия протектора от солености растворов № 22.

Указать водные бассейны, соленость воды которых приблизительно соответствует солености использованных растворов. Сделать вывод об эффективности использования цинковых протекторов для защиты от коррозии корпусов речных судов.

Какие объекты могут быть защищены от коррозии только цинковыми протекторами?

Опыт 4. Влияние параметров катодной защиты на эффективность защиты стали от коррозии.

Составить электрическую цепь катодной защиты, включающую в себя источник постоянного тока, регулятор напряжения, амперметр, вольтметр, ключ, анод и объект защиты. Проверить правильность подключения проводов от выходных клемм источника тока:  $\oplus$  - к аноду (графитовому стержню);  $\ominus$  - к катоду (стальной образец). Не замыкая цепь ключом, поместить анод и катод в колена U-образной трубки, заполненной морской водой. Измерить стационарный потенциал стали с помощью хлорсеребряного электрода сравнения. Далее, замкнув цепь поляризации и регулируя величину защитного тока с помощью переменного сопротивления, обеспечить последовательно в течение 3 мин такие защитные потенциалы стали, чтобы сдвиг защитного потенциала ( $\Delta \varphi_{\text{защ}} = \varphi_{\text{стац}} - \varphi_{\text{защ}}$ ) составил 500...100...150 мВ (см. рис. I).

Занести соответствующие значения параметров катодной защиты в таблицу.

Как изменяется интенсивность выделения газов на электродах при различных режимах поляризации?

Почему при катодной защите запрещается сильно снижать величину защитного потенциала, например, для стали до значений меньших, чем -900 мВ?

Написать уравнения реакций, протекающих на катоде и аноде.

Добавить в колена трубки по 2-3 капли фенолфталеина и объяснить причину изменения окраски раствора.

На практике, при использовании катодной защиты, в ре-