

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ

На правах рукописи

УДК 628.162

НАЙМАНОВ Аубекир Ягопирович

ПРОТИВНАКИПНАЯ ЭЛЕКТРООБРАБОТКА ВОДЫ В СИСТЕМАХ  
ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

05.23.04 - Водоснабжение, канализация, строительные  
системы охраны водных ресурсов

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Харьков - 1994

НИИ В. Стефан  
UA

АВ 31.064

Диссертацией является рукопись

Работа выполнена в Донбасском инженерно-строительном институте

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Д.И.Кучеренко

Доктор технических наук, профессор Г.С.Пантелют

Доктор технических наук, профессор В.М.Рогов

Ведущая организация - "Гипросталь" (г.Харьков)

Защита диссертации состоится "9" НОЯБРЯ 1994 г.  
в 11<sup>00</sup> час на заседании Специализированного Совета Д.02.07.01  
по присуждению ученой степени доктора технических наук при  
Харьковском техническом университете строительства и архитек-  
туры.

Заверенные отзывы в 2-х экземплярах просим присылать по  
адресу: ЗИООС2 г.Харьков, 2, Сумская 40.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьков-  
ского технического университета строительства и архитектуры.

Автореферат разослан 27.09 1994 г.

Ученый секретарь Специализированного

Совета, к.т.н., доцент



Н.И.Колотило

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00777150 (R)

АВ 31.065

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие промышленности приводит к постоянному росту потребления воды и истощению водных ресурсов. В значительной мере сокращения расхода воды можно добиться при переводе предприятий на системы оборотного водоснабжения, а в перспективе – на бессточные системы. Остро стоит вопрос обеспечения предприятий водой в Украине в связи с относительно небольшими водными ресурсами и наличием развитой промышленности.

Применение оборотных и бессточных систем водоснабжения требует решения ряда вопросов, значительное место среди которых занимает борьба с накипеобразованием в теплообменной аппаратуре. Большинство современных методов снижения накипеобразования связано с использованием реагентов, которые усиливают загрязненность воды.

Противонакипная электрообработка воды выгодно отличается отсутствием реагентов и низкими затратами электроэнергии материальных и трудовых ресурсов. Однако ее распространению препятствует слабая изученность механизма действия, границ применимости и эффективности, рациональных технических и экономических параметров. Требуется научное обоснование инженерных аспектов противонакипной электрообработки воды.

Цель работы. Подвести научно обоснованную базу под инженерные аспекты противонакипной электрообработки воды, всесторонне оценить ее преимущества и недостатки, выяснить место противонакипной электрообработки в ряду современных методов снижения накипеобразования в системах оборотного водоснабжения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ современных представлений о накипеобразовании и применении электрообработки для ее подавления;
- оценка противонакипной электрообработки с точки зрения теории электрохимических явлений в водной среде;
- выяснение механизма действий электрообработки на процесс накипеобразования в теплообменниках;
- оценка влияния факторов качества воды и параметров электрообработки на эффективность противонакипного действия;
- построение эмпирической обобщающей модели, адекватно описывающей взаимосвязь между накипеобразованием, параметрами воды и электрообработки;
- создание экспериментально-теоретической базы для расчета процессов противонакипной электрообработки в системах оборотного водоснабжения;
- разработка основных принципиальных схем промышленных противонакипных электрических аппаратов и проведение испытаний процесса противонакипной электрообработки в различных отраслях промышленности;
- оценка эффективности противонакипной электрообработки при подпитке оборотных систем доочищенными сточными водами и ее влияния на коррозию и биообрастания;
- определение технически и экономически целесообразных границ применимости противонакипной электрообработки в системах оборотного водоснабжения.

На защиту выносятся:

- теоретические представления о механизме действия электрообработки воды на процессы накипеобразования;
- результаты экспериментальных исследований по противонакипной электрообработке воды в системах оборотного водоснабжения;

- установленные закономерности влияния факторов качества воды и параметров электрообработки на эффективность противонакипного действия электрообработки;
- новые технические решения и рациональные области применения противонакипной электрообработки воды в системах оборотного водоснабжения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- осуществлено научное обоснование нового метода подавления накипеобразования в теплообменниках оборотных систем водоснабжения электрообработкой воды постоянным током;
- выявлен механизм действия электрообработки на процессы накипеобразования в системах оборотного водоснабжения;
- построена эмпирическая обобщающая модель, адекватно описывающая взаимосвязи между накипеобразованием, параметрами воды и электрообработки и подведена научно обоснованная база под инженерные аспекты противонакипной электрообработки воды в оборотном водоснабжении.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- разработан и испытан эффективный безреагентный способ борьбы с накипеобразованием электрообработкой воды постоянным током, способствующей прекращению загрязнения водоемов стоками оборотных систем водоснабжения, отличающийся простотой реализации и эксплуатации, малыми затратами электроэнергии, материалов и трудовых ресурсов;
- создана база для расчетов и разработаны основные конструктивные схемы промышленных противонакипных электрических аппаратов для различных условий;
- проведены испытания противонакипной электрообработки в химической, металлургической промышленности и теплоэнергетике, доказана ее высокая эффективность и возможность перевода охлаждающих систем в бессточный режим;

- определены технически и экономически целесообразные границы применимости противонакипной электрообработки в системах оборотного водоснабжения;

- на основе результатов исследований организован выпуск промышленных открытых и напорных противонакипных электрических аппаратов по заказам предприятий.

Внедрение результатов исследований осуществлялось на Рубежанском химическом заводе "Заря", Макеевском коксохимическом заводе, металлургических комбинатах им. Ильича (г. Мариуполь) и "Криворожсталь", Белгородском витаминном комбинате и Астраханском газоперерабатывающем заводе.

Апробация. Основное содержание работы представлено и одобрено на Всесоюзных, республиканских и институтских научно-технических конференциях в городах Киеве (1993), Москве (1989), Харькове (1987), Донецке (1983, 1986), Ровно (1980, 1983), Макеевке (1979-1993). Всего сделано 16 сообщений.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 19 статей и докладов, получено одно авторское свидетельство.

## 2. ОБЪЕМ И СТРУКТУРА РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, 9 глав, общих выводов, списка литературы из 210 наименований, в том числе: 46 зарубежных. Изложена на 370 страницах машинописного текста, содержит 37 таблиц, 54 рисунка.

Во введении диссертации обоснована актуальность проблемы: сформулированы цели и задачи исследований, дана общая характеристика работы.

Первая глава посвящена анализу современных представлений о причинах, движущих силах и основных процессах образования накипных отложений. Показана высокая степень вероятности действия электрических сил при осаждении накипи в теплообменниках.

Во второй главе представлены сведения о путях воздействия электрообработки на накипеобразования, основных способах и устройствах для противонакипной электрообработки воды.

В третьей главе дана оценка воздействий при противонакипной электрообработке с точки зрения современных теоретических представлений. Выведены зависимости для определения параметров электрообработки.

Четвертая глава посвящена экспериментальной оценке на лабораторных установках влияния отдельных параметров электрообработки на процесс накипеобразования в теплообменниках.

В пятой главе представлены несколько построенных эмпирических обобщающих моделей накипеобразования при действии электрообработки воды, дана статистическая оценка моделей и возможности их применения для инженерных расчетов.

В шестой главе представлены результаты промышленных испытаний противонакипной электрообработки воды в химической, металлургической и коксохимической промышленности и в теплоэнергетике. Дан анализ применимости расчетных зависимостей для использования в промышленных условиях.

В седьмой главе приведены данные о работе электродных систем противонакипных электрических аппаратов, их стойкости и долговечности.

Восьмая глава посвящена оценке влияния электрообработки и фильтрования через насадку из стеклозершей на интенсивность накипеобразования и биологических обрастаний.

В девятой главе приведена обобщенная технико-экономическая оценка противонакипной электрообработки воды.

### 3. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

#### 3.1. Анализ современных представлений о накипеобразовании

Нагрев, упаривание и аэрация воды в системах оборотного водоснабжения приводят к пересыщению воды накипеобразователями и осаждению накипи по стенке теплообменников. Главным компонентом накипи при температурах воды до 70-75°C является карбонат кальция. Скорости выделения карбоната кальция зависит от движущей силы процесса. В соответствии с кинетикой химических реакций движущей силой считается абсолютное пересыщение воды, которому эквивалентен принятый в литературе по накипеобразованию термин-мгновенный избыток карбоната кальция. Он зависит от щелочности, pH, содержания кальция, температуры и солесодержания воды. Достаточно хорошей характеристикой движущей силы является и степень пересыщения воды (кристаллизационный напор), соответствующая предложенному Мак-Коули индексу движущей силы (Д. Ф. У.).

Наиболее обоснованным представляется описание скорости выделения карбоната кальция из воды с помощью уравнения, предложенного Р. Фергюсоном

$$g = A e^{-\frac{E_a}{RT}} [\alpha]^n, \text{ моль/л.с} \quad (1)$$

где:  $g$  - скорость выделения карбоната кальция;  
 $A$  - фактор частоты,  $A = 6,92 \cdot 10^{10}$  л/моль·с;  
 $E_a$  - энергия активации процесса,  $E_a = 14,49$  кал/моль;  
 $R$  - универсальная газовая постоянная,  $R = 1,987$  кал/град·моль;  
 $T$  - температура воды, °К;

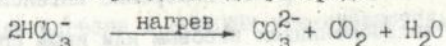
$[\alpha]$  - мгновенный избыток карбоната кальция, моль/л;

$n$  - порядок реакции.

В случае осаждения накипи на чистые стенки теплообменников величину  $n$  предлагается принимать равной 1, а при наличии ранее осевшей накипи  $n = 2-2,2$ .

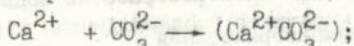
Процесс выделения из воды карбоната кальция обычно считают состоящим из ряда стадий:

- термохимический распад бикарбонатов с образованием карбонат-ионов и молекул диоксида углерода



- удаление углекислого газа;

- образование ионных ассоциатов



- начальное кристаллообразование с переходом ассоциатов в молекулы карбоната кальция;

- образование центров кристаллизации (зародышей кристаллов);

- рост зародышей с образованием кристаллов и их сростков.

Эти процессы могут протекать как в объеме воды, так и на стенке теплообменника. Для систем оборотного водоснабжения характерным считается образование кристаллов карбоната кальция в объеме воды с последующим их прикреплением к стенкам теплообменников в виде накипи. При начальном кристаллообразовании и росте зародышей размер частиц карбоната близок к коллоидному. Измерения электрокинетического потенциала показали, что  $\zeta = + (3,4-39,8)\text{ мВ}$ . Часть этих микрокристаллов прикрепляется к стенкам теплообменников, оставшиеся частицы растут в объеме воды и осаждаются в сооружениях для охлаждения воды.

Наиболее вероятной причиной закрепления частиц накипи преимущественно на стенках теплообменников следует считать возникновение разности электрических потенциалов между горячей поверхностью

металла и омывающей ее более холодной водой (термо-а.д.с.). Силы адгезии обратно пропорциональны размеру частиц, а силы гидродинамического сноса пропорциональны кубу размера. Поэтому, с увеличением размеров микрокристаллов карбоната кальция резко уменьшается вероятность их закрепления на стенках теплообменников. Кроме того, усиление турбулентности может способствовать ускорению выделения накипеобразователей в объеме воды за счет увеличения коэффициента диффузии.

Для количественной оценки процесса накипеобразования наиболее надежным критерием следует считать прямое измерение интенсивности образования отложений в теплообменниках весовым или иным способом.

### 3.2. Обзор сведений о применении электрообработки воды для подавления накипеобразования

Вероятность электрохимического механизма осаждения накипи и наличие заряда у накипеобразующих частиц породили целый ряд устройств и способов, основанных на электрообработке воды. В зависимости от протекающих при электрообработке процессов все они могут быть разбиты на две группы:

- основанные на воздействии электролиза воды и продуктов электродных реакций (электрохимическое умягчение, электролитическая и электрохимическая коагуляция, электрохимическое подкисление

- основанные на силовом воздействии электрического поля (электрофорез, электрокоагуляция, электрическая активация кристаллизации):

Наиболее ранняя работа по использованию электрохимического умягчения для снижения накипеобразования принадлежит Фархадову А.А. Метод, однако, требовал высоких энергозатрат, что не способствовало его распространению. Более рациональны устройства, изменяющие

свойства частиц накипи таким образом, что они не могут уже прикрепляться к стенкам теплообменников. Типичным представителем этого ряда, является устройство, предложенное в США *J. Agnaud*. Оно представляет собой пакет плоских металлических электродов, на которые подается постоянный ток напряжением от 0,7 до 10 В. Вся циркулирующая вода пропускается между электродами, но заметного электрохимического умягчения не происходит, только тормозится рост кристаллов и их агломерация. Но такое объяснение противоречит теории, которая утверждает, что с уменьшением размеров частиц силы адгезии к стенкам увеличиваются.

Значительное количество подобных устройств и способов предложено во Франции и Японии. Основным элементом здесь являются плоские или цилиндрические электроды, на которые подается постоянный или пульсирующий ток. Величина тока должна обеспечивать такое изменение свойств накипеобразующих частиц или показателей качества воды, что осаждение накипи в теплообменниках подавляется. Однако, каких-либо зависимостей, связывающих эффективность противонакипного действия с параметрами тока и качеством воды не предлагается.

При силовом воздействии поля без протекания электролиза происходит поляризация частиц, ускоряется кристаллизация и агломерация накипи в объеме воды. Во многих разработках предлагается использовать систему плоских, а чаще цилиндрических электродов, поверхность которых изолирована от воды различными покрытиями-стеклом, пластиком. На электроды подается высокое (0,1-10 кВ) постоянное или переменное напряжение. Обрабатываемая вода пропускается между электродами и под действием поля накипеобразующие частицы теряют способность прикрепляться к стенкам теплообменников. В какой-то мере данный вид электрообработки можно считать подобным магнитной обработке. Эффективность

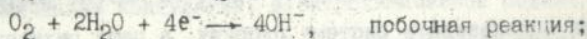
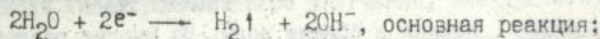
воздействия поля, по сведениям авторов, достаточно высока, но никаких конкретных цифр и зависимостей для ее оценки не приводится. Неясно, как, вообще, накипеобразователи выводятся из воды. Более перспективной и надежной представляется электрообработка постоянным током, сопровождающаяся электролизом воды и осаждением накипи на электродах.

Значительные разногласия в конструкциях и параметрах устройств и способов электрообработки, объяснении механизма их воздействия и эффективности, выявили необходимость всесторонней экспериментальной и теоретической оценки противонакипной электрообработки, создания надежного научного обоснования инженерных аспектов процесса.

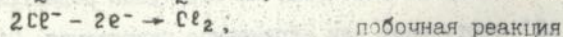
### 3.3. Оценка противонакипной электрообработки постоянным током с точки зрения современных теоретических представлений

Электрообработка воды постоянным током в действующих системах оборотного водоснабжения приводит к наложению электролиза воды на термохимические процессы и явления массопередачи. При электролизе воды на электродах протекают следующие реакции:

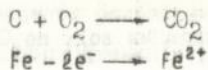
на катоде



на нерастворимых (инертных) анодах



На графитовых и ферросилидовых анодах могут протекать процессы разрушения материала электродов



В любом случае прианодное пространство характеризуется повышенной концентрацией ионов  $\text{H}^+$ , а прикатодное - ионов  $\text{OH}^-$ .

Циркулирующая вода, вследствие ранее описанных термохимических процессов, представляет собой сложную нестабильную систему, пересыщенную карбонатом кальция. В прианодном пространстве поток ионов  $\text{H}^+$  от электрода действует аналогично подкислению, способствует распаду зародышей и центров кристаллизации карбоната кальция. В прикатодном пространстве поток ионов  $\text{OH}^-$  способствует увеличению пересыщения воды карбонатом кальция, появлению центров кристаллизации и ускорению его выделения в виде относительно крупных агрегатов частично в объеме воды, частично на поверхности электрода. Оба электродных процесса приводят к снижению вероятности осаждения вторичной накипи в теплообменниках. Наличие электрического поля ускоряет передвижение ионов и частиц и усиливает действие электродных процессов. Эффективность снижения накипеобразования зависит от величины тока электролиза.

Определение необходимого для подавления накипеобразования тока может быть выполнено на базе различных подходов к механизму действия электрообработки. Удобнее при этом определять не сам ток, а расход электричества на единицу объема добавочной воды (дозу электричества).

Подкислительный подход основан на снижении накипеобразования за счет электрохимического подкисления при пропускании циркулирующей воды через анодную зону диафрагменного электролизера. Доза электричества в этом случае определяется по формуле:

$$\partial_3 = 26,8 [\text{x}] \cdot 10^3, \quad \text{А-ч/м}^3 \quad (2)$$

$$\partial_3 = 26,8 \partial_{\text{кс}}, \quad \text{А-ч/м}^3 \quad (2\text{A})$$

здесь  $\partial_{кс}$  - доза кислоты для стабилизации воды по СНиП

2.04.02-84.

Коагуляционный подход аналогичен обычной реагентной коагуляции. Считается, что находящиеся в коллоидно-дисперсном состоянии положительно заряженные частицы карбоната кальция под действием потока ионов  $\text{OH}^-$  в катодном пространстве коагулируют и образуют относительно крупные агрегаты, не способные прикрепляться к стенкам теплообменников. Доза электричества пропорциональна содержанию частиц карбоната кальция в воде

$$\partial_3 = K'_1 [\text{X}]^{-0,25} \lg[\text{X}], \quad \text{А-ч/м}^3 \quad (3)$$

здесь  $K'_1$  - коэффициент, зависящий от к.п.д. электрохимического процесса и константы скорости реакции выделения карбоната кальция из воды.

Умягчительный подход основан на электрохимическом снижении карбонатной жесткости добавочной воды до требований СНиП 2.04.02-84. В этом случае доза электричества

$$\partial_3 = 26,8 \left( J_{\text{карб.доб}} - \frac{3}{K_y} \right), \quad \text{А-ч/м}^3 \quad (4)$$

где  $J_{\text{карб.доб}}$  - карбонатная жесткость подпиточной воды, г-экв/м<sup>3</sup>;

$K_y$  - коэффициент упаривания воды в оборотной системе.

Кристаллизационный подход базируется на активации процесса кристаллизации карбоната кальция за счет воздействия электрической энергии. Доза электричества может определяться по двум формулам

$$\partial_3 = \frac{4,6 [\text{X}] \cdot 10^5}{U \cdot \eta}, \quad \text{А-ч/м}^3 \quad (5)$$

либо

$$\partial_3 = \frac{26,8}{P_{\text{доб}} \cdot \eta} \left( \frac{3 \cdot \text{PP}_{\text{CaCO}_3}}{j_2^2 \cdot K_y [\text{Ca}^{2+}]_{\text{доб}}} - [\text{X}] \right), \quad \text{А-ч/м}^3 \quad (5A)$$

здесь:  $U$  - напряжение между электродами, В;

$\eta$  - к.п.д. процесса электролиза, %;

$P_{\text{доб}}$  - подпитка оборотной системы, %;

$Pr_{CaCO_3}$  - произведение растворимости карбоната кальция;

$f_2$  - коэффициент активности двухвалентных ионов;

$[Ca^{2+}]_{доб}$  - концентрация ионов кальция в добавочной воде, г-эке/м<sup>3</sup>

При электрофоретическом подходе энергия электрического поля должна обеспечить сближение и столкновение ионов кальция и карбоната с последующим образованием и выделением из воды карбоната кальция. Дозу электричества предлагается определять по формуле:

$$\vartheta_3 = \frac{1 \cdot 100}{2,4 \rho \Theta (1,2 [x])^{1/2}} \cdot \frac{100}{Q_f \cdot P_{доб}} \cdot A - 4 / M^3 \quad (6)$$

где:  $\rho$  - удельное сопротивление обрабатываемой воды, ом см

$\Theta$  - продолжительность электрообработки, с;

$Q_f$  - отношение расхода циркулирующей воды к площади электродов (гидравлическая нагрузка на электроды) м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч.

В реальных условиях электрообработки оборотной воды возможно одновременное сочетание различных электрохимических явлений и эмпирическая зависимость дозы электричества от параметров воды не обязательно будет отвечать одному какому-либо подходу.

#### 3.4. Экспериментальная оценка влияния отдельных параметров воды и электрообработки на процесс накинеобразования в лабораторных условиях

Лабораторные исследования проводились на отдельном стенде, представляющем собой аналог системы оборотного водоснабжения. Циркуляция и аэрация воды обеспечивалась эрлифтом, охлаждение протекало, кроме того, в открытом резервуаре оборотной системы. Теплообменники представляли собой две трубки диаметром 8 мм и длиной 150 мм, из нержавеющей стали, погруженные в колбу с дистиллированной водой. Колба устанавливалась на электропечи. Скорость циркуляции воды через трубки и резервуар оборотной системы

могла регулироваться в пределах 0,1-0,2 м/с. Перепад температур между нагретой и охлажденной водой составлял 1-3°C. Температура воды в оборотной системе могла регулироваться до 72-73°C, температура воды в колбе с дистиллятом была при этом выше на 25-28°C. Для электрообработки воды в циркуляционном контуре устанавливались электроды, ток подавался от блока питания. Аноды обычно были графитовые, катоды - стальные. Количество накипи оценивалось взвешиванием трубок. Длительность опытов, в зависимости от цели, принималась от 1 до 55 суток.

Воздействие различных видов электрического тока на накипеобразование изучалось в серии поисковых исследований и получены следующие величины снижения количества накипи в теплообменниках:

- обработка воды постоянным током от выпрямителя, сглаженным на ( L - C ) фильтре - 92%;
- обработка постоянным током от однополупериодного выпрямителя - 77%;
- обработка воды выпрямленным током с импульсами синусоидальной формы, частотой 1 кГц - 24%;
- то же, частотой 10 кГц - 3%;
- то же частотой 100 кГц - увеличение накипи на 21%;
- выпрямленный ток с импульсами треугольной формы частотой 1 кГц - увеличение накипи на 15%;
- то же, частотой 10 кГц - увеличение накипи на 9%;
- то же частотой 100 кГц - 7%;
- переменный ток частотой 50 Гц - 49%.

Электрообработка воды постоянным током обеспечивает наибольший эффект снижения накипеобразования что соответствует теоретическим выкладкам. Согласно им, электрокоагуляция частиц накипи возможна при относительно небольших частотах поля, порядка до 60 Гц. Результаты опытов свидетельствуют в пользу электро-

коагуляционного механизма снижения накипеобразования. В дальнейшем все опыты проводились при электрообработке воды постоянным током.

Влияние электродных процессов оценивалось разделительным пропусканьем через теплообменники анолита и католита. Эффект снижения накипеобразования при этом оказался практически одинаковым.

Интересные закономерности выявились при использовании сетчатых электродов, расположенных поперек потока воды. Если циркулирующая вода сначала проходила через катод, а затем анод, то эффективность снижения накипеобразования была на 9-10% выше, чем при пропускании воды между плоскопараллельными электродами при одних и тех же параметрах тока. В случае же прохода сначала через анод, а потом катод, отмечалось не снижение, а увеличение накипеобразования в теплообменниках. Объясняется первое явление тем, что в прикатодном пространстве происходит агломерация частиц карбоната кальция, которые уже не распадаются под действием электрохимического подкисления в прианодном пространстве. Здесь распадаются только оставшиеся мельчайшие зародыши, которые могли бы осесть на стенки теплообменников. Во втором же случае сначала в прианодном пространстве распадаются имеющиеся микрокристаллы, а затем в прикатодном пространстве снова возникают даже в большем количестве эти микрокристаллы, которые прикипают к теплообменным поверхностям.

Из параметров электрообработки постоянным током наибольшее влияние на накипеобразование оказывает доза электричества в расчете на циркулирующую ( $D_3$ ) или добавочную воду ( $d_3$ ):

$$D_3 = \frac{J \cdot \tau}{W_{об}} = \frac{J \cdot \tau}{Q_{об} \cdot \tau} = \frac{i \cdot F}{Q_{об}} = \frac{i}{q_f}, \text{ А} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$$

$$d_3 = \frac{J \cdot \tau}{W_{доб}} = \frac{i \cdot F}{q_{доб}} = \frac{i}{q_f}, \text{ А} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$$

- где  $J$  - величина тока электрообработки, А;  
 $\tau$  - продолжительность работы оборотной системы, час;  
 $W_{об}, W_{доб}$  - объемы оборотной и добавочной воды соответственно, прошедшие за время  $\tau$  через межэлектродное пространство, м<sup>3</sup>;  
 $Q_{об}, q_{доб}$  - расходы оборотной и добавочной воды в оборотной системе, м<sup>3</sup>/ч;  
 $i$  - плотность тока электрообработки, А/м<sup>2</sup>;  
 $Q_f, q_f$  - гидравлические нагрузки на электроды соответственно по оборотной или добавочной воде, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч.

Очевидно, что влияние дозы электричества проявляется через влияние плотности тока и гидравлической нагрузки. В ряде публикаций сообщалось, что количество накипи в теплообменниках обратно пропорционально плотности тока и прямо пропорционально гидравлической нагрузке. Однако, экспериментальные данные свидетельствуют о более сложном характере связи между накипеобразованием и дозой электричества (рис.1). Она достаточно хорошо описывается степенной зависимостью вида

$$d_3 - 20 = -[0,5(q - 20)]^5 \quad (7)$$

Статистическая оценка по величине корреляционного отношения показала, что данная функция обеспечивает более эффективное описание результатов, чем зависимости типа  $q \sim f\left(\frac{1}{d_3}\right)$  или  $q \sim f(e^{-d_3})$ .

График функции (7) нанесен на рис.1 в виде кривой. Вполне очевидно его подобие типичной коагуляционной кривой при реагентном удалении из воды взвешенных веществ, порог коагуляции находится около 20 А-ч/м<sup>3</sup>.

Результаты опытов при температуре циркуляционной воды 35° и 70°С дали аналогичные результаты (рис.2). Уравнения кривых I и 2 имеют следующий вид:

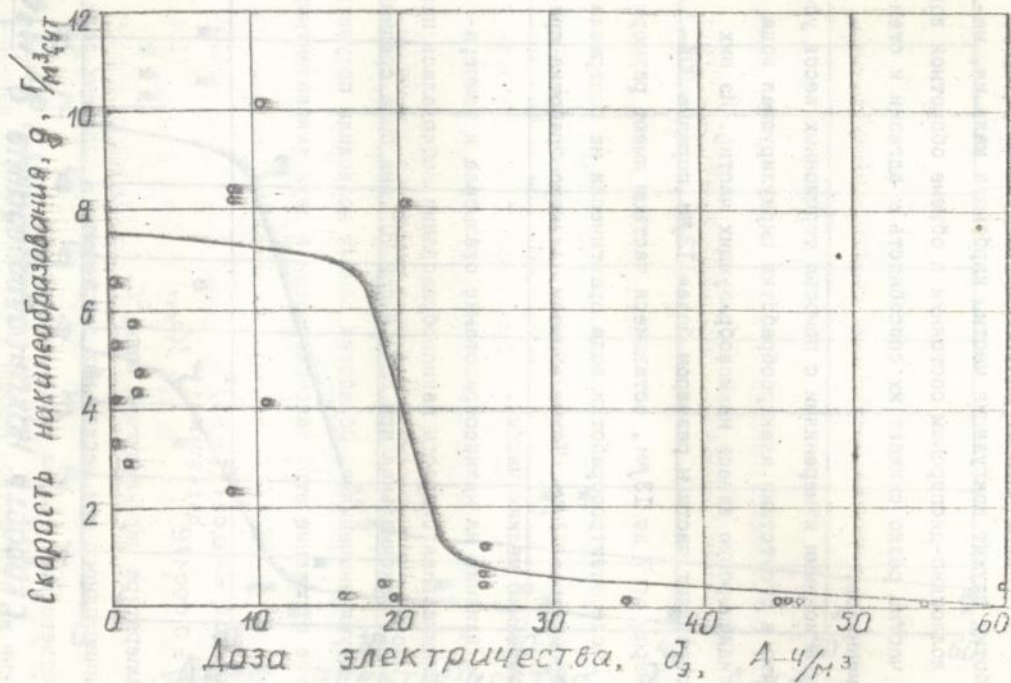


Рис. I. Зависимость скорости накипеобразования от дозы электричества при температуре воды 55°C

$$\partial_9 - 10 = - (g - 2)^5 \quad \text{при } t = 35^\circ \quad (8)$$

$$\partial_9 - 12 = - [0,5 (g - 4)]^3 \quad \text{при } t = 70^\circ \quad (9)$$

Можно утверждать, что основой противонакипного действия электрообработки служит коагуляция частиц карбоната кальция, находящихся в коллоидно-дисперсном состоянии в объеме оборотной воды. Агломерация частиц резко снижает их способность к адгезии к стенкам теплообменников.

Седиментационными измерениями с помощью торсионных весов установлено, что в отсутствие электрообработки циркулирующая вода содержит полидисперсную взвесь накипеобразующих частиц. Из них около 50% составляют частицы размером более 13 мкм, порядка 30% — частицы размером от 7 до 13 мкм, оставшиеся частицы имеют размеры менее 7 мкм. После электрообработки вода практически не содержала частиц размером менее 11 мкм. Таким образом, электрообработка привела к исчезновению мелких частиц.

Заметное влияние на накипеобразование оказывала и температура воды. Минимальная скорость накипеобразования наблюдалась при температуре 35°, максимальная при 55°, а при 70° она была средней между этими двумя значениями. Обработка данных позволила получить математическое отражение этой закономерности в двух эквивалентных вариантах:

$$g - 10,4 = -0,021 (t - 55)^2 \quad (10)$$

$$\text{либо } g = 0,00017 e^{0,4t - 0,0036t^2}, \quad \frac{r}{M^2 \text{сут}} \quad (10A)$$

где  $t$  — температура циркулирующей воды, °C.

Кстати, наличие одного или нескольких экстремумов в подобных зависимостях соответствует теории роста кристаллов.

Во времени же количество накипи в теплообменниках изменялось по следующим закономерностям:

- по линейному закону в относительно кратковременных опытах (до 10-15 суток);

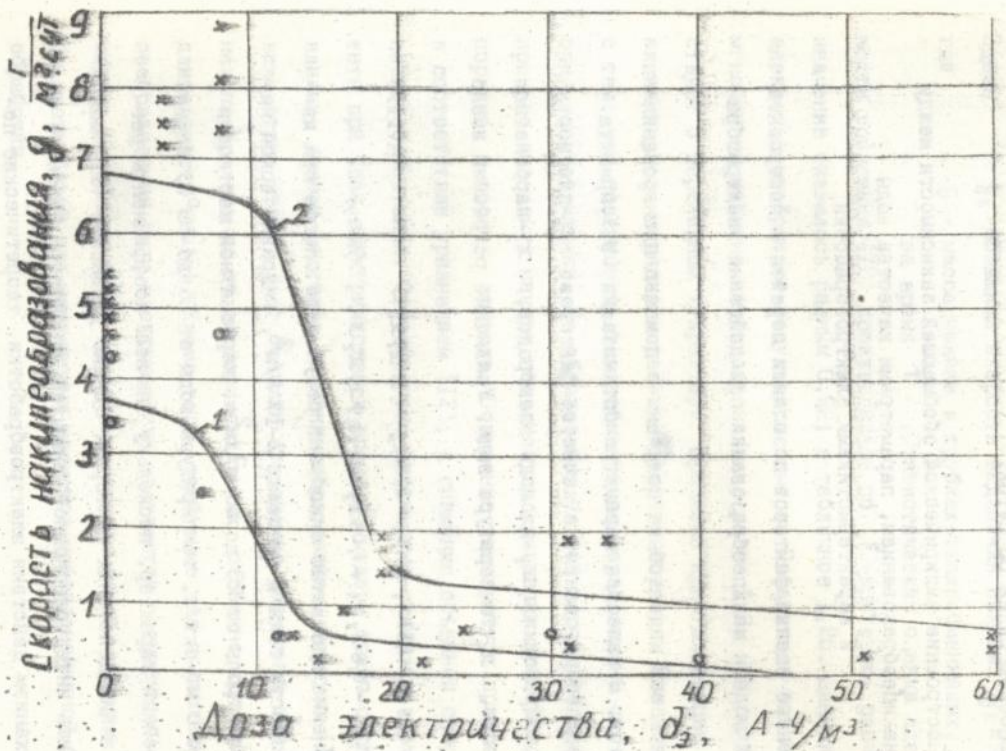


Рис. 2. Зависимость скорости накипеобразования от дозы электричества при температуре воды 35°C и 70°C.

- по S-образной кривой с постепенным затуханием в опытах длительностью до 55 суток;

- по параболическому закону с постепенным затуханием в опытах длительностью более 55 суток.

### 3.5. Построение эмпирической обобщающей зависимости между накипеобразованием, параметрами качества воды и характеристиками электрообработки

Полученные оценки факторов позволили перейти к построению более общей модели накипеобразования при действии электрообработки.

Первая такая модель была получена с помощью планирования экспериментов. В качестве параметра оптимизации ( $Y$ ) принята скорость накипеобразования, в качестве факторов:  $x_1$  - плотность тока электрообработки,  $x_2$  - площадь электродов,  $x_3$  - карбонатная жесткость воды,  $x_4$  - температура воды. Уравнение регрессии имело вид

$$Y = 6,3 - 4,28x_1 - 1,37x_2 + 4x_3 + 3,14x_4 - 1,21x_1x_4 - 1,1x_2x_3 - 0,8x_2x_4 + 1,03x_3x_4 - 0,9x_1x_2x_4, \quad \tau/\text{м}^2\text{сут} \quad (\text{II})$$

Данное уравнение адекватно описывает результаты опытов при изменении плотности тока в пределах 2-10 А/м<sup>2</sup>, гидравлической нагрузки на электроды от 20 до 40 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч, карбонатной жесткости воды от 3 до 6 мг-экв/л, температуры воды от 35 до 55°С. Модель имеет нелинейный характер, поскольку значимы коэффициенты регрессии при взаимодействиях факторов. Однако уравнение (II) может считаться лишь интерполяционной формулой, поскольку здесь не отражается механизм действия электрообработки, теоретические положения кинетики накипеобразования.

Вторую модель поэтому было решено построить, задаваясь видом связи между факторами на базе теоретических положений, выказанных в предыдущих разделах. Результаты 212 опытов на наки-

пеобразованию при различных значениях факторов подвергнуты компьютерной статистической обработке и получено уравнение множественной регрессии.

$$q_2 = 2,89[x]^{1,3} e^{\left(\frac{1561}{T} - 0,026d_3 - 0,049t\right)} \cdot \frac{r}{m^3 \text{сут}} \quad (12)$$

Здесь  $q_2$  - объемная скорость выделения накипи,  $q_2 = \frac{G}{W_{\text{об}} T}$  ;  
где  $G$  - масса накипи в трубах-теплообменниках, осевшая

за время  $t$ . Статистическая оценка адекватности уравнения (12) производилась по  $F$ -критерию, расчетное значение оказалось равным 0,92; а табличное 1,26. Данная модель адекватно отображает результаты опытов. Показатель степени при мгновенном избытке карбоната кальция равен 1,3, что свидетельствует о переходном характере процесса кристаллизации от реакции первого порядка к реакции второго порядка. Это связано с тем, что поверхность теплообменников перед каждым опытом очищалась от накипи. До образования на ней зародышей кристаллов процесс выделения накипи подчиняется уравнению кинетики первого порядка, а после - второго. Повышение температуры приводит, в соответствии с уравнением (12), к снижению объемной скорости накипеобразования. Относительно небольшими оказались коэффициенты при дозе электричества и времени, модель слабо отражает влияние данных факторов на накипеобразование. Формула (12), вследствие этого, дает большие отклонения расчетных значений накипеобразования от экспериментальных, особенно при небольшой длительности опытов. Кроме того, требуемые для подавления накипеобразования дозы электричества получаются завышенными. Необходимо изыскание более приемлемых зависимостей, которые могли бы стать базой для инженерных расчетов противонакипной электрообработки.

Вообще, основной интерес в расчетах представляет доза электричества, обеспечивающая подавление или снижение до при-

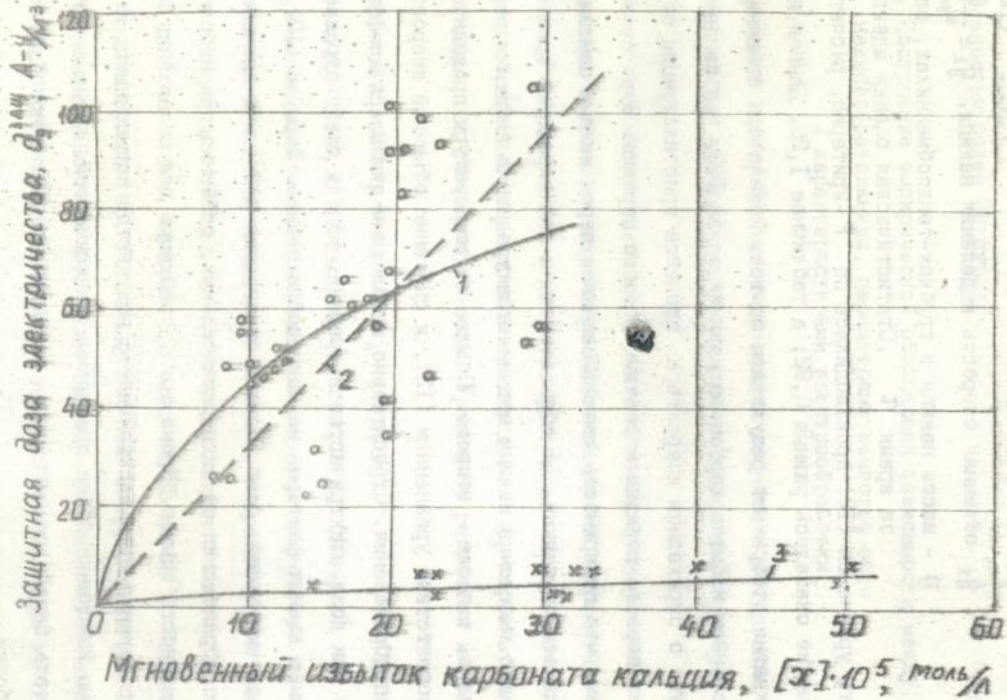


Рис. 3. Зависимость защитной дозы электричества от мгновенного избытка карбоната кальция при температуре воды 55°C

емлемой величины накипеобразование. Ее можно назвать защитной дозой электричества  $\partial_3^{3\text{лщ}}$ . Для определения этой дозы из общего массива экспериментальных данных были выделены результаты опытов, в которых объемная скорость накипеобразования оказалась менее  $0,5 \text{ г/м}^3$  сут. Полученные точки нанесены на график в координатах: мгновенный избыток карбоната кальция - доза электричества (защитная). Данный график для температуры воды  $55^\circ$  приведен на рис.3. Экспериментальные точки отчетливо разбились на два блока, для длительности опытов до 30 суток в верхней части графика и для длительности опытов 55 суток в нижней части графика. В относительно кратковременных опытах (до 30 суток) связь между  $[x]$  и  $\partial_3^{3\text{лщ}}$  может быть практически с одинаковым успехом отображена в виде квадратичной (линия 1) или линейной (линия 2) зависимости. Однако в длительных опытах связь несомненно ближе квадратичной. Это вновь подтверждает переход от реакции первого порядка к реакции второго порядка по мере закрытия поверхности теплообменников накипью. Естественно, что в производственных условиях теплообменники работают в длительном режиме и зависимость тогда следует принимать квадратичную. Обработка данных позволила получить следующие формулы:

- для кратковременных опытов (линия 1)

$$\partial_3^{3\text{лщ}} = 4,5 \sqrt{[x] \cdot 10^6}, \quad A=4/\text{м}^3 \quad (13)$$

- для длительных опытов (линия 3)

$$\partial_3^{3\text{лщ}} = 0,36 \sqrt{[x] \cdot 10^6}, \quad A=4/\text{м}^3 \quad (14)$$

Отметим, что в длительных опытах защитная доза электричества ниже, чем в кратковременных более чем в 10 раз. Также длительные опыты дали меньший разброс результатов. По внешнему виду формулы (13) и (14) напоминают зависимость дозы коагулянта от мутности или цветности воды. Концентрация взвеси накипеобразующих частиц в воде, разумеется, не равна мгновенному избытку но, несомненно, коррелирована с ним.

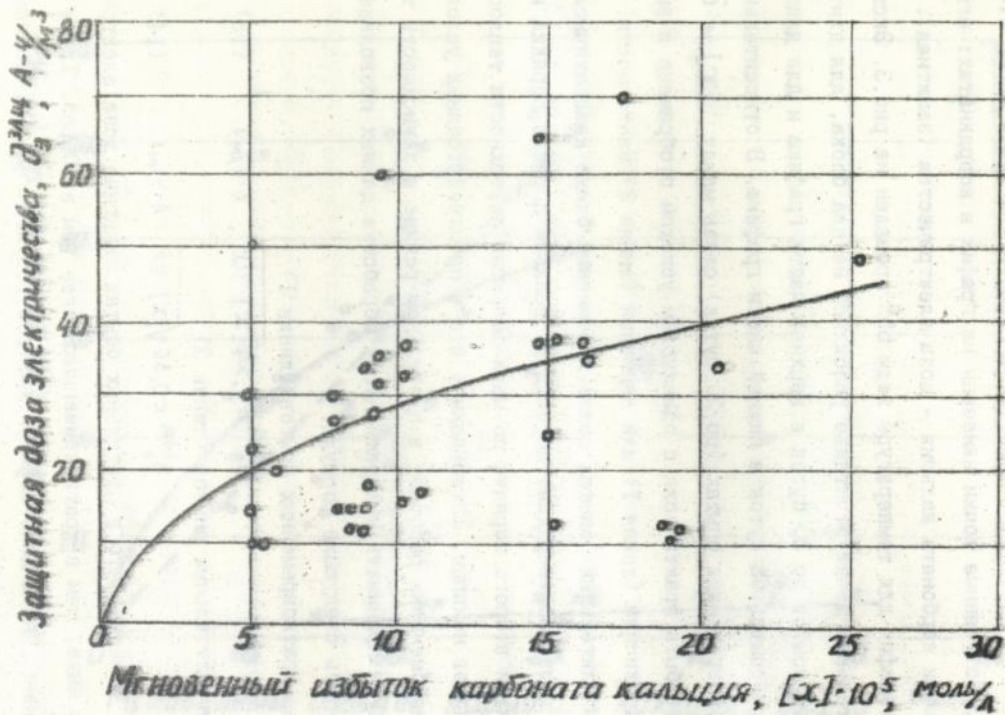


Рис. 4. Зависимость защитной дозы электричества от мгновенного избытка карбоната кальция при температуре 70°C.

Параболический характер связи между мгновенным избытком карбоната кальция и защитной дозой электричества становится более заметным в результатах опытов при температуре воды 70° (рис.4). Длительность опытов составляла от 15 до 27 суток, разброс данных довольно велик, но характер связи прослеживается достаточно убедительно. Опять наибольшие отклонения дали кратковременные опыты (до 16 суток), которые сгруппировались в верхней части графика с заметным отрывом от остального массива данных (4 точки).

Связь между величиной мгновенного избытка карбоната кальция и защитной дозой электричества можно отобразить в виде формулы:

$$d_3^{3\text{Ач}} = 3 \sqrt{[x] \cdot 10^6}, \quad A-4/M^3 \quad (15)$$

Отметим, что здесь защитные дозы электричества несколько меньше, чем в кратковременных опытах при температуре 55° (формула 13).

Теперь, для получения более общей зависимости формулы (13-15) необходимо объединить и еще ввести влияние температуры воды из ранее найденных закономерностей (формула 10 или 10А). В результате такой операции получена формула для условий длительной эксплуатации противонакипной электрообработки в системах оборотного водоснабжения

$$d_3^{3\text{Ач}} = 0,006 [x]^{0,5} e^{0,4t - 0,0036 t^2}, \quad A-4/M^3 \quad (16)$$

В случае же необходимости отображения общей связи между накипеобразованием, дозой электричества и температурой, можно воспользоваться зависимостью, объединяющей формулы (6-10).

$$d_3 - 20 \left[ 1 - \frac{0,025(t-55)}{20} \right] \approx [0,5(g-4)]^5 \quad (17)$$

Формула (17) представляет собой третью модель связи между параметрами в условиях электрообработки. Задавшись допустимой скоростью накипеобразования  $g \left( \frac{\Gamma}{M^2 \text{сут}} \right)$  и температурой воды в оборотной системе  $t$  (°C) можно найти необходимую для подавления накипеобразования дозу электричества.

Для обработки вод в начальный период эксплуатации защитную дозу электричества можно найти по формуле:

$$\vartheta_3^{\text{таб}} = 0,07 [\alpha]^{0,5} e^{0,4t - 0,0026t^2} \cdot (1 - 0,05i), \text{ А-ч/м}^3 \quad (\text{Iв})$$

Проверка адекватности формулы (Iв) - критерию показал, что расчетное значение критерия составило 0,69, а табличное 1,53 при уровне значимости 0,05. Уравнение (Iв) адекватно отображает результаты опытов, а значительная разница между расчетным и табличным значениями критерия указывает на более качественную аппроксимацию экспериментальных данных, чем уравнением (I2). Хотя все эти формулы, строго говоря, справедливы только для условий лабораторной установки, они достаточно четко отражают качественные взаимосвязи между факторами в оборотных системах. Формулы (I3-I8) по внешнему виду подобны формуле (3), отражающей коагуляционный подход к механизму действия.

Непосредственное использование формул (I3-I8) для практических расчетов нежелательно без ввода коэффициентов перехода от лабораторных условий к производственным.

Интересно сравнить расчетные дозы электричества для подавления накипеобразования по разным формулам на конкретном примере. Для оборотной системы производительностью 1000 м<sup>3</sup>/ч величиной подпитки 5%, температуре 35°C, Щ= 6 мг-экв/л, Са<sup>2+</sup>=5 мг-экв/л, рН=8,35, солесодержание 800 мг/л, и величина мгновенного избытка карбоната кальция  $[\alpha] = 1,36 \cdot 10^{-4}$  моль/л получим следующие величины доз электричества:

по формуле (II)  $\vartheta_3 = 4 \text{ А-ч/м}^3$  (при  $i = 10 \text{ А/м}^2$ ,  $\bar{q}_f = 50 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ );

по формуле (I2)  $\vartheta_3 = 48,3 \text{ А-ч/м}^3$  (при  $\tau = 10$  сут);

$\vartheta_3 = 10,5 \text{ А-ч/м}^3$  (при  $\tau = 30$  сут);

по формуле (I6)  $\vartheta_3 = 1,02 \text{ А-ч/м}^3$  (при  $\tau > 30$  сут);

по формуле (I8)  $\vartheta_3 = 6,0 \text{ А-ч/м}^3$  (при  $\tau < 30$  сут,  $i = 10 \text{ А/м}^2$ )

Счевидно, что в начальный период электрообработки требуются повышенные дозы электричества. При увеличении срока работы требуемые дозы по формуле (12) постепенно приближаются к дозам по формулам (II), (Iб) и (Iв), Формула же (12) дает средние величины доз электричества для подавления накипеобразования. Конкретный выбор доз электричества зависит от допустимости образования каких-либо количеств накипи на поверхности теплообменников. Следует иметь в виду, что наличие тонкого слоя накипи в значительной мере снижает опасность коррозии оборудования.

Для перехода от скорости накипеобразования в лабораторной установке ( $q_{\text{ЛАБ}}$ ) к скорости накипеобразования в промышленных условиях ( $q_{\text{ПРОМ}}$ ) при одинаковом составе воды и материале теплообменников можно использовать выведенное соотношение.

$$q_{\text{ПРОМ}} = q_{\text{ЛАБ}} \frac{w_{\text{Г}}^{\text{ПРОМ}} [(1,74 + 26g \frac{z}{e}) \bar{u}]_{\text{ЛАБ}}}{w_{\text{Г}}^{\text{ЛАБ}} [(1,74 + 26g \frac{z}{e}) \bar{u}]_{\text{ПРОМ}}} \quad (19)$$

где  $\bar{u}$  – средние скорости течения в теплообменниках, м/с;

$z$  – радиусы трубок в теплообменниках, м;

$e$  – высота выступов шероховатости в трубках, м;

$w_{\text{Г}}$  – гидравлические нагрузки на единицу площади теплообменников по расходу добавочной воды, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч.

Данное соотношение позволяет учесть различие условий диффузии накипеобразующих частиц к стенкам теплообменников и различие гидравлических нагрузок по добавочной воде.

### 3.6. Результаты промышленных испытаний

Промышленные испытания противонакипной электрообработки проводились на предприятиях химической, металлургической и коксохимической промышленности, а также теплоэнергетике. Условия в оборотных системах этих предприятий весьма различны, что позволяет получить достаточно разностороннюю оценку метода. Параметры электрообработки рассчитывались на базе результатов ла-

бораторных исследований.

Различие условий потребовало разработки нескольких схем противонакипных аппаратов: безнапорных, напорных, с графитовыми или ферросилидовыми анодами. В комплект промышленного аппарата входит электродная система и источник постоянного тока. В качестве источника тока использовались стандартные выпрямители типа ВСА, ВАК, ВАКР, КСС, АР13 и т.д. Мощность выпрямителя зависела от требуемой величины тока электрообработки.

Схема электродной системы безнапорного противонакипного аппарата приведена на рис.5. Электроды закреплены в раме 1 из металлических уголков, к которой приварены катоды 2 из листовой стали. Графитовые аноды 3 изолированы от рамы прокладками из резины или пластика. На электроды подавался постоянный ток от выпрямителя. По сути аппарат представлял собой электролизер с монополярным соединением электродов. Размещался он либо в резервуарах градирен (рис.6), либо в аванкамерах циркуляционных насосов. Площадь электродов и количество аппаратов зависели от производительности оборотной системы и требуемого тока электрообработки. Обязательными условиями было пропускание всей циркулирующей воды через противонакипной аппарат. Напорные аппараты представляли собой закрытую стальную емкость, в которой установлена электродная система.

В химической промышленности наиболее длительные испытания проведены на химзаводе "Заря" в г.Рубежное в двух оборотных системах.

В оборотном цикле производительностью 550 м<sup>3</sup>/ч был смонтирован в резервуаре вентиляторной градирни противонакипной аппарат с площадью катодов 20 м<sup>2</sup>, а графитовых анодов 5 м<sup>2</sup>. Подпиточная вода имела следующие показатели: Щ = 3,1-6,0 мг-экв/л; Жс=5,2-15,0 мг-экв/л; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>=115-219 мг/л; Cl<sup>-</sup>=39-470 мг/л; содержание Р = 600-1100 мг/л; рН = 6,9-8,4. Оборотная вода

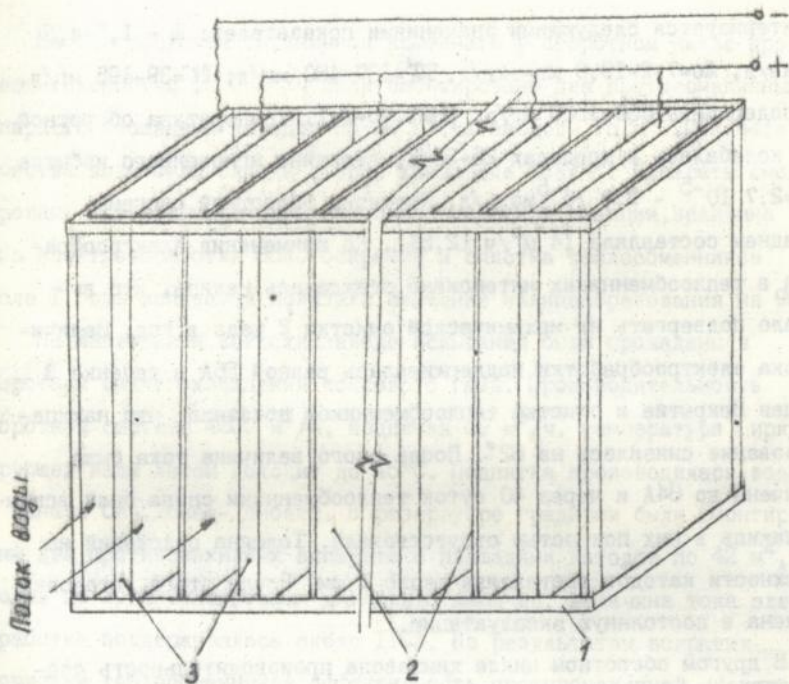


Рис. 5. Схема электродной системы безапорного противонакипного электрического аппарата

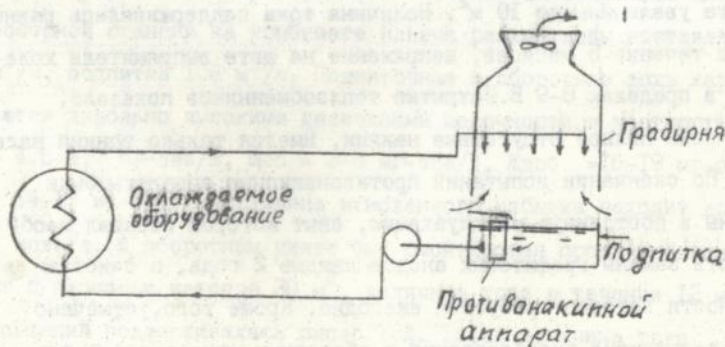


Рис. 6. Схема размещения электродной системы противонакипного аппарата в обратном щитле

характеризуется следующими значениями показателей:  $\text{Щ} = 1,5-4,5$  мг-экв/л,  $\text{Жо} = 7,2-19,0$  мг-экв/л,  $\text{SO}_4^{2-} = 137-480$  мг/л;  $\text{Cl}^- = 39-495$  мг/л. соледержание 650-1500 мг/л,  $\text{pH} = 7,75-9,1$ . Температура оборотной воды колебалась в пределах 25-35°C, величина мгновенного избытка  $[\text{x}] = 2,7 \cdot 10^{-5} - 9,4 \cdot 10^{-5}$  моль/л. Подпитка оборотной системы в среднем составляла 14 м<sup>3</sup>/ч (2,5%). До применения электрообработки в теплообменниках интенсивно осаждалась накипь, что вынуждало подвергать их механической очистки 2 раза в год. Величина тока электрообработки поддерживалась равной 56А в течение 3 месяцев. Вскрытие и очистка теплообменников показало, что накипобразование снизилось на 82%. После этого величина тока была увеличена до 84А и через 40 суток теплообменники снова были вскрыты, накипь в них полностью отсутствовала. Толщина отложений на поверхности катодов составляла около 1 см. После этого установка включена в постоянную эксплуатацию.

В другом оборотном цикле химзавода производительность составляла 900 м<sup>3</sup>/ч, подпитка 35 м<sup>3</sup>/ч (4%). Показатели качества подпиточной и оборотной воды были близки к вышеприведенным. В резервуаре градирни были смонтированы 2 противонакипных аппарата, аналогичных вышеописанному, только площади анодов в каждом аппарате увеличены до 10 м<sup>2</sup>. Величина тока поддерживалась равной 130 А в течение 5 месяцев, напряжение на щите выпрямителя колебалось в пределах 8-9 В. Вскрытие теплообменников показало, практически полное отсутствие накипи, имелся только тонкий налет грязи. По окончании испытаний противонакипные аппараты были включены в постоянную эксплуатацию, опыт которой показал необходимость замены графитовых анодов каждые 2 года, а очистка поверхности катодов требуется ежегодно. Кроме того, отмечено полное отсутствие биообрастаний в оборотных циклах с электрообработкой.

На Белгородском витаминном комбинате в оборотном цикле производительностью  $1500 \text{ м}^3/\text{ч}$  были смонтированы два противонакипных аппарата с площадями катодов по  $30 \text{ м}^2$ , а анодов —  $15 \text{ м}^2$ . Показатели качества воды были близки к воде химзавода "Заря". Аппараты смонтированы в аванкамере циркуляционной насосной станции, величина тока электрообработки  $85 \text{ А}$ . Вскрытие и очистка теплообменников после I года испытаний показали снижение накипеобразования на  $90\%$ .

На Макеевском коксохимзаводе испытания были проведены в оборотном цикле охлаждения коксового газа. Производительность оборотной системы  $4200 \text{ м}^3/\text{ч}$ , подпитка  $80 \text{ м}^3/\text{ч}$ , температура циркулирующей воды летом доходит до  $45^\circ\text{C}$ . Подпитка производилась водой из канала Сев.Донец-Донбасс. В резервуаре градирни были смонтированы два противонакипных аппарата с площадями катодов по  $42 \text{ м}^2$ , анодов по  $20 \text{ м}^2$ . Испытания длились 6 месяцев, величина тока электрообработки поддерживалась около  $110 \text{ А}$ . По результатам вскрытия и очистки теплообменников эффективность противонакипной электрообработки оказалась близкой к  $95\%$ .

Испытания в металлургической промышленности проводились как в "чистых", так и "грязных" оборотных циклах на комбинатах им. Ильича (г. Мариуполь) и "Криворожсталь". В чистом оборотном цикле компрессорной станции на комбинате Ильича расход воды составлял  $1120 \text{ м}^3/\text{ч}$ , подпитка  $108 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Подпиточная и оборотная вода характеризуются довольно высокими величинами щелочности и жесткости: Щдоб =  $4,6-4,7 \text{ мг-экв/л}$ , Щоб =  $3-5 \text{ мг-экв/л}$ , Ждоб =  $16-19 \text{ мг-экв/л}$ , Жоб =  $14-17 \text{ мг-экв/л}$ , величина мгновенного избытка доходит до  $4 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л}$ . В оборотном цикле был смонтирован противонакипной аппарат с площадью катодов  $30 \text{ м}^2$ , величина тока в течение 12 месяцев испытаний поддерживалась около  $75 \text{ А}$ . Такая величина тока была явно недостаточна, однако большего размера было невозможно аппараты смонтировать. Эффективность противонакипного действия электрообработки оказалась близкой к  $70\%$ .

Испытания в чистом оборотном цикле кислородного цеха комбината "Криворожсталь" длилась 6 месяцев. Производительность оборотного цикла составляла 16 тыс. м<sup>3</sup>/ч, подпитка 1100 м<sup>3</sup>/ч (6,9%), подпиточная вода имела Щ = 2,3-3,8 мг-экв/л, соледержание 270-360 мг/л, оборотная вода Щ = 3-3,9 мг-экв/л, Жо = 3,9-7,3 мг-экв/л, соледержание 285-555 мг/л, pH = 8,2-8,7, мгновенный избыток [x] = 2,69 · 10<sup>-5</sup> - 9,37 · 10<sup>-5</sup> моль/л. В резервуарах башенных градирен были смонтированы 8 противонакипных аппаратов с площадью электродов по 30 м<sup>2</sup> (катоды). Однако в испытаниях работали только 6 аппаратов в связи с ремонтом одной из градирен. Ток электрообработки составлял 300А, что почти в 3 раза меньше расчетного, однако из-за недостаточной мощности источников постоянного тока увеличить ток оказалось невозможным. Испытания длились 6 месяцев, вскрытие и очистка теплообменников показали эффективность снижения накипеобразования в теплообменниках около 55%.

Испытания в "грязном" оборотном цикле проводились в системе оборотного водоснабжения газоочисток мартеновского цеха комбината им. Ильича. Расход оборотной воды 560 м<sup>3</sup>/ч, подпиточной - около 100 м<sup>2</sup>/ч. Оборотная вода характеризуется следующими показателями Що=2,5-6,4 мг-экв/л, Жо=18,5-26,0 мг-экв/л, соледержание 3460-4910 мг/л, pH=9,8-11,0. взвешенные вещества (после отстойников 15-20 мг/л, температура 18-28°C. В аванкамере циркуляционной насосной станции после отстойников был смонтирован противонакипной аппарат с площадью катодов 20 м<sup>2</sup>, величина тока поддерживалась 50А, что несколько меньше расчетной величины. Испытания длились 3 месяца, эффективность противонакипного действия оценивалась с помощью индикаторных трубок и составила 87,6%. В аппарате быстро накапливается слой отложений на катоде, что требовало ежемесячной чистки катодов механическими скребками.

В теплоэнергетике испытания проводились на теплоэлектроцентралях в оборотном цикле охлаждения конденсаторов. Расход оборотной воды около  $1200 \text{ м}^3/\text{ч}$ , подпиточной  $150-190 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Средние показатели качества оборотной воды:  $\text{Що}=0,77 \text{ мг-экв/л}$ ,  $\text{Жо}=16,6 \text{ мг-экв/л}$ , сухой остаток  $1900 \text{ мг/л}$ ,  $\text{pH}=8,10$ . В подпиточной воде отмечено значительное содержание органических веществ и до  $1 \text{ мг/л}$  железа. В оборотной системе смонтированы 2 противонакипных аппарата с площадью катодов по  $12 \text{ м}^2$ . Ток электрообработки поддерживался около  $80 \text{ А}$ , что соответствовало расчетному значению. Общая длительность испытаний составила 6 месяцев, вскрытие и очистка конденсаторов после испытаний показали полное отсутствие накипи и биообращений (эффект  $100\%$ ).

В ходе всех испытаний контролировались показатели качества воды до и после аппаратов. Снижение жесткости и щелочности обычно не превышали  $2-5\%$ , величина  $\text{pH}$  практически не менялась.

Результаты промышленных испытаний полностью подтвердили закономерности, полученные в лабораторных условиях и высокую эффективность противонакипной электрообработки.

### 3.7. Изучение особенностей работы электродов противонакипных аппаратов

В результате электродных процессов на катоде обычно образуются отложения и выделяется водород, на аноде — выделяется кислород, идет "холодное" горение графита и растворение ферросилидных анодов. Эти явления изучались в лабораторных и производственных условиях

Установлено, что количество катодных отложений возрастает с ростом температуры воды и ростом дозы электричества. Колеблется оно в пределах  $80-250 \text{ г/м}^2 \text{ сут}$ . Зависимость количества отложений

от плотности тока имеет вид кривой с максимумом в районе плотности тока  $5-10 \text{ А/м}^2$ , причем максимум имеет более ярко выраженный характер при температуре  $55^\circ$ , при более низких температурах максимум размыт в пределах плотностей тока  $8-12 \text{ А/м}^2$ .

Во времени при длительности опытов до 55 суток отложения на катоде растут практически по линейному закону и их толщина достигает через 50 суток 2,5 мм. Установлено, что на поверхности катодов осаждается от 5 до 26% всей массы выделяющегося карбоната кальция. Состав отложений практически идентичен составу накипи в теплообменниках, однако при повышении плотности тока возрастает содержание магния. Отложения имеют зернистый характер и относительно слабо сцеплены с поверхностью катода. При достижении толщины порядка 5-10 мм большая часть отложений отслаивается и осыпается с поверхности электрода.

Графитовые аноды постепенно разрушаются продуктами электролиза. Электрохимический эквивалент графита пропорционален плотности тока и по данным лабораторных и промышленных испытаний составляет 758-1200 г/А·год. Срок работы графитового анода для хлорной промышленности в промышленных аппаратах при плотности тока до  $10 \text{ А/м}^2$  обычно составляет 2 года.

Ферросилидовые аноды показали большую стойкость, электрохимический эквивалент при повышении плотности тока от 7,5 до  $84 \text{ А/м}^2$  увеличился от 18,9 до 208,2 г/А·год. Однако, при одних и тех же дозах электричества ферросилидовые аноды обеспечивают противонакипной эффект на 15-20% меньший, чем при использовании графитовых анодов. Это связано с попаданием в воду железа при разрушении анода.

Изучение газовыделения на электродах показало, что выделение водорода и в стальном катоде протекает с к.п.д. близким к 100%, на графитовом аноде газовыделение заметно только в первые 1-2 часа работы, затем вообще исчезает. Видимо, практически весь вы-

деляющийся кислород идет на окисление графита. Химанализы воды не установили выделение хлора на графитовом аноде.

### 3.8. Влияние электрообработки на биообрастания и коррозию в оборотных системах

Лабораторные и промышленные испытания показали, что электрообработка способствует снижению биообрастаний в оборотных системах даже при подпитке циклов очищенными промышленными стоками. Опыты со стеклянными "ловчими" пластинками в лабораторной установке дали снижение массы биообрастаний при электрообработке на 20%. В промышленных условиях при электрообработке воды вообще не наблюдалось обрастаний градилен водорослями, а на поверхности рамы противонакипного аппарата наблюдалось скопление погибших водных организмов.

Сочетание электрообработки с фильтрацией через насадку в виде "ершей" из стекловолокон позволяет довести снижение массы биообрастаний на "ловчих" стеклах в оборотных системах до 70%. В промышленных условиях такое сочетание позволяло добиться полного прекращения как накипеобразования так и биообрастаний. Насадка играет роль концентратора биообрастаний, а продукты электродных реакций адсорбируются на них и способствуют прекращению жизнедеятельности обрастаний.

Промышленные испытания проводились в оборотном цикле производительностью 900 м<sup>3</sup>/ч при дозе электричества около 3 А·ч/м<sup>3</sup> и отношении площади поверхности насадки к расходу оборотной воды около 3,1 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Длительность испытаний составила 6 месяцев. Отмечено полное отсутствие накипи в теплообменниках и биообрастаний в оборотной системе. Кроме того перманганатная окисляемость воды снизилась на 5-6%, а содержание взвешенных веществ на 25-30%.

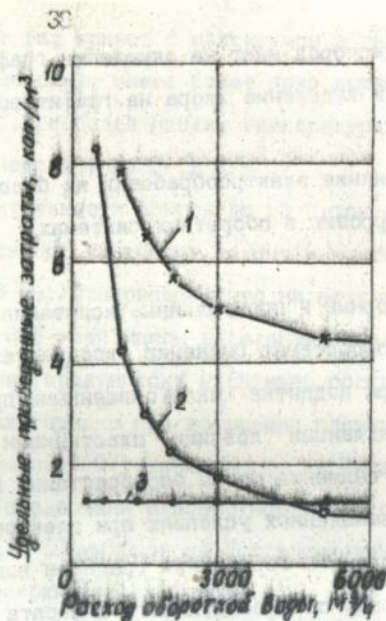


Рис. 7. Удельные приведенные затраты для бассейна реки Северский Донец

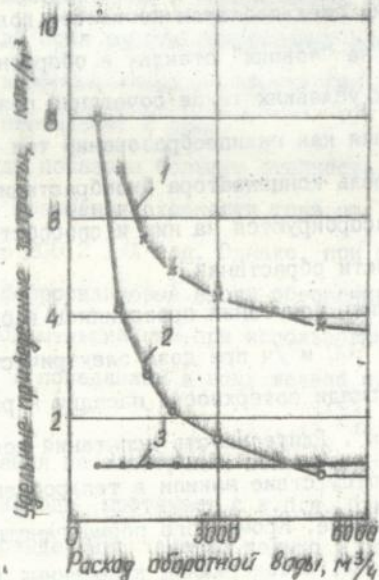


Рис. 8. Удельные приведенные затраты для бассейна реки Днепр.

Исследования коррозионных свойств воды в лабораторных условиях и промышленных условиях показали, что электрообработка не оказывает существенного влияния на скорость коррозии стали.

### 3.9. Техничко-экономическая оценка противонакипной электрообработки воды

Техничко-экономические показатели противонакипной электрообработки воды и конкурирующих методов снижения накипеобразования рассчитаны по укрупненным показателям в справочной литературе, типовых проектах, а также по фактическим затратам, имевшим место при внедрении данных научных разработок.

Расчеты выполнены в ценах 1964 г., что позволяет перевести величины показателей в цены любого текущего периода с помощью коэффициентов пересчета, учитывающих изменение экономической конъюнктуры и инфляции.

Выполнено сравнение технико-экономических показателей противонакипной электрообработки воды с подкислением, обработкой воды полифосфатом натрия и добавлением комплексона ОАДФК. Сравнение выполнено для двух регионов: предприятия в бассейне Днепра и в бассейне Сев.Донца. Вычислены капитальные и эксплуатационные затраты, себестоимость и удельные приведенные затраты при разных производительностях оборотных систем. Величины удельных приведенных затрат на 1 м<sup>3</sup> расхода оборотной воды в год нанесены на графики (рис. 7 и 8). Здесь линия 1-обработка воды ОАДФК; 2-кислотой или полифосфатом натрия; 3-электрообработка воды.

Сравнение графиков показывает, что электрообработка воды для подавления накипеобразования экономически целесообразна при относительно небольших расходах воды в оборотных системах, до 4-5-5 тыс. м<sup>3</sup>/ч. При расходах же воды до 1000 м<sup>3</sup>/ч капитальные

и эксплуатационные затраты практически на порядок меньше у противонакипной электрообработки по сравнению с реагентными методами.

Большим преимуществом электрообработки является отсутствие реагентов, вода дополнительно ничем не загрязняется. Не требуется продувки и оборотные системы могут быть переведены в бессточный режим. К недостаткам можно отнести необходимость периодической очистки поверхности катодов от отложений и необходимость периодической замены анодов вследствие их износа.

Простота устройства и эксплуатации, отсутствие добавочного обслуживающего персонала, низкие энергозатраты, которые не превышают  $0,003$  квт-ч/м<sup>3</sup> расхода оборотной воды делают противонакипную электрообработку в значительной степени привлекательным и перспективным способом снижения накипеобразования в оборотном водоснабжении.

Выпуск противонакипных электрических аппаратов налажен по заказам предприятий в Донбасском инженерно-строительном институте.

## ОГДЕ ВВЕОД. Ю РАВТЕ

1. Анализ современных представлений о накипеобразовании в теплообменниках и электрообработке воды показывает возможность эффективного снижения накипеобразования за счет воздействия электрохимических процессов. Наиболее надежной и перспективной представляется электрообработка воды постоянным током.

2. На основе теоретических закономерностей протекания электрохимических процессов коагуляции, кристаллизации, умягчения, подкисления и электрофореза получен ряд формул для определения необходимого для подавления карбонатного накипеобразования тока электрообработки в зависимости от величин мгновенного избытка карбоната кальция, карбонатной жесткости, температуры и соле-содержания воды, а также к.п.д. электролиза, величины подпитки и коэффициента упаривания.

3. Экспериментальным путем выявлен коагуляционный механизм действия электрообработки воды постоянным током на накипеобразующие компоненты при осаждении карбоната кальция и основные факторы, влияющие на ее эффективность (мгновенный избыток карбоната кальция, температура, время и доза электричества).

4. Статистической обработкой массива лабораторных экспериментальных данных получены адекватные уравнения регрессии, связывающие скорость накипеобразования в теплообменниках с дозой электричества, величиной мгновенного избытка карбоната кальция, температурой и временем. Они подводят достаточно надежную научную базу под инженерные аспекты применения электрообработки в оборотном <sup>воде</sup> снабжении.

5. Промышленные испытания в различных условиях на химических, коксохимических, металлургических предприятиях и в теплоэнергетике подтвердили надежность научной базы противонакипной электро-

обработки воды, справедливость основных расчетных зависимостей, высокую эффективность противонакипного действия, работоспособность и надежность основных конструктивных решений противонакипных электрических аппаратов. При соблюдении расчетных параметров тока эффективность снижения накипеобразования составляла не менее 90-95%, а расход электроэнергии на обработку оборотной воды не превышал 0,003 кВт-ч/м<sup>3</sup>.

6. Техничко-экономическими расчетами показана предпочтительность использования противонакипной электрообработки воды перед реагентными методами снижения накипеобразования (подкисление, фосфатирование, введение комплексонов) при производительности оборотных систем водоснабжения до 4-5 тыс.м<sup>3</sup>/ч. При расходах воды до 1000 м<sup>3</sup>/ч затраты на противонакипную электрообработку в 8-10 раз ниже, чем при использовании реагентных методов. Применение электрообработки исключает загрязнение воды реагентами, способствует переводу оборотных систем в бессточный режим и прекращению загрязнения водоемов стоками оборотных систем.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах автора:

1. Найманов А.Я., Никиша С.Б. Выбор метода подготовки очищенных сточных вод для подпитки оборотных систем водоснабжения химзавода //ИТЛ "Строительство и архитектура (неопубликованные материалы)". Вып.6.- М.: ЦИНИС, 1978.

2. Найманов А.Я., Никиша С.Б., Балинченко О.И. Опыт выбора и применения ингибиторов коррозии в оборотном водоснабжении химзавода. //Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. 1982.- № 8.- с.109-112.

3. Найманов А.Я., Кузнецова С.М., Никиша С.Б. Электрический антинакипной аппарат // Экспресс-информ.: Газовая про-сть. Экономика, организация и управление производством в газ. про-сти. М.: ВНИИГаз-пром.- 1963.- с.26-30.

4. Найманов А.Я., Никиша С.Б. Исследование работы антинакипного электрического аппарата // Пром. энергетика.-1963. № II.- с.43-45.

5. Найманов А.Я., Никиша С.Б. Антинакипные электрические аппараты в оборотном водоснабжении // Водоснабжение и санитарная техника.- 1964.- № 2.- с.22-23.

6. Найманов А.Я., Никиша С.Б., Ковтун С.В. Использование доочищенных сточных вод для промышленного водоснабжения // Рациональное использование вторичных ресурсов. Тез. докл. научн. конф. - Донецк: Донецк. политехн. ин-т, - 1966.- 208 с.

7. Найманов А.Я., Никиша С.Б., Ковтун С.В., Казимиров Е.К. Противонакипные электрические аппараты для систем оборотного водоснабжения // Экспресс-информ.-: Стечев. производств. опыт.- М.: ВНИИСЭТИ.- 1966, вып.3.- с.9-10.

8. Найманов А.Я., Ковтун С.В., Казимиров Е.К., Судакова В.В. Биохимическая доочистка сточных вод химзавода // Водоснабжение и санитарная техника.- 1968.- № 10. - с.24-26.

9. Найманов А.Я., Никиша С.Б., Ковтун С.В., Иващенко В.Ф., Чекарева Э.Л. Подавление накипеобразования в теплообменной аппаратуре электрообработкой оборотной воды // Кокс и химия.- 1969.- № 5.- с.36-39.

10. Найманов А.Я., Расчет величины тока для противонакипной электрообработки воды // Очистка природных и сточных вод. Тез. докл. Всесоюзн. научно-техн. совещания.- М.: ВНИИ ВОДГЕО.- 1969.- с.226.

11. Гождон И.Н., Найманов А.Я. Моделирование условий работы внутренней поверхности стальных водопроводных труб //Очистка природных и сточных вод. Тр. Новочеркасского политех. ин-та.- 1972.- т.249.- с.20-25.
12. Найманов А.Я. Катодная защита внутренней поверхности стальных водопроводных труб. Там же. с.25-29.
13. Найманов А.Я., Никиша С.Б. Снижение накипобразования в системе оборотного водоснабжения //Актуальные проблемы водохозяйственного строительства: Тез.докл.республ.научно-техн.конф.- Ровно.- 1980.
14. Найманов А.Я., Никиша С.Б., Ковтун С.В. Противонакипная электрообработка воды в оборотном водоснабжении // Проектирование, эксплуатация и исследование систем оборотного водоснабжения промышленных предприятий: Материалы семинара. М.: МДНП.- 1987.- 178 с.
15. Найманов А.Я., Кравченко М.В., Плеханова Т.Б. Снижение накипобразования в водогрейных теплогенераторах посредством электрообработки воды //Новые технологические решения для строительной промышленности Донбасса. Тр./,Киев: УМК ВО.- 1989.- с.140.
16. Найманов А.Я., Губарь В.Ф., Кравченко М.В., Плеханова Т.Б. Снижение накипобразования в водогрейных теплогенераторах путем электрообработки воды //Библиограф. указат.депонир. рукописей ВНИИС Госстроя СССР.- 1989.- вып.7.
17. А.с. 1555295 СССР, МКИ С 02 F 1/46. Способ предотвращения осаждения накипи на теплообменных поверхностях /Найманов А.Я., Никиша С.Б., Ковтун С.В., Надтока А.Т.- опубл. 7.04.90.

18. Найманов А.Я., Кравченко М.В. Влияние электрообработки на накипеобразование в теплообменниках // Новые технологические процессы и оборудование в области очистки воды и трубопроводов. Сб. научн. тр. / Отв.ред. Куликов Н.И. - Киев: УМК ВО. - 1991. - с.28-39.
19. Найманов А.Я., Ковтун С.В., Гречаний П.А. Использование активного угля для снижения окисляемости природной воды // Инженерные решения экологических проблем Донбасса. - Киев: УМК ВО. - 1992. - с.92.

Neimanov A.J. Antiskale Electric Treatment of Water in the cooling Water Circuit Systems.

Dissertation for degree of Doctor Of Science on 05.23.04 - Water Suppli and Sewerage specialiti, the Kharkov Universiti of Constraction and Architecture, Kharkov, 1994.

The dissertation contains the analysis of present day ideas about scale depositing end employing electric treatment for its removal, theoretical and experimental estimation of the effect of water parameters and electric treatment on scale depositing and drawing empiricel generalizing dependences between them, the results of laboratory and field tests of antiscae electric apparatuses in the chemical end metallurgy cal indstry, technical and economics value.

Найманов А.Я. Противонакипная электрообработка воды в системах оборотного водоснабжения.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических

наук по специальности СБ.23.04 - водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов, Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры, Харьков, 1994.

Диссертация содержит анализ современных представлений о накипеобразовании и применении электрообработки для ее подавления, теоретическую и экспериментальную оценку влияния параметров воды и электрообработки на накипеобразование и построение эмпирических обобщающих зависимостей между ними, результаты лабораторных и промышленных испытаний и внедрения противонакипных электрических аппаратов в химической и металлургической промышленности, технико-экономическую оценку.

Ключові слова: оборотне водопостачання, накипоутворення, карбонат кальція, теплообмінники, електрообробка, постійний струм, доза електрики, електрокоагуляція, хімічна та металургійна промисловість.

Подписано к печати 16 0000 Заказ 867 тираж 100,  
Изд. уч. изд. Способ печати офсетный.  
Донецкая городская типография

454481

