

ОБРАБОТКА ВОДЫ НА АЭС

ЛЕКЦИЯ №10

Тайлашева Татьяна Сергеевна
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

ТЕМА 7. ОБРАБОТКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ

2

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3

Основная часть природной воды, потребляемой ТЭС и АЭС используется в **системах охлаждения** для конденсации пара. Расходы охлаждающей воды достаточно велики (**60 - 100 кг на конденсацию 1 кг пара**), например, её расход для ГРЭС мощностью 2400 МВт более 300 тыс. м³/ч.

Основные требования к качеству охлаждающей воды:

- **температура**, обеспечивающая глубину вакуума в конденсаторе и нормальную работу теплообменников;
- **не вызывала образования отложений** минерального и биологического характера;
- **не вызывала коррозии** оборудования и трубопроводов.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

4

Естественно, что при столь больших расходах воды для охлаждения конденсаторов, масло- и газоохладителей, **вопрос об ее тщательной очистке** с удалением всех примесей, напрямую связан с **себестоимостью** охлаждающей воды

Системы охлаждения

Прямоточные

- естественные водоемы

Оборотные

- с прудами - охладителями
- с градирнями или брызгальными бассейнами

Прямоточные системы охлаждения

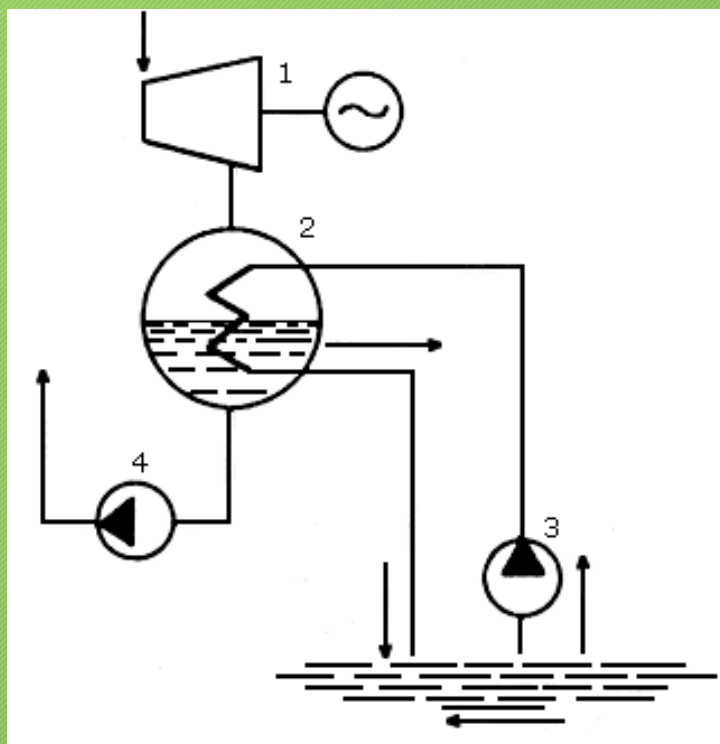


Схема прямоточного охлаждения

1 - турбина; 2 - конденсатор; 3 - насосы береговой насосной; 4 - конденсатный насос

Прямоточные системы охлаждения

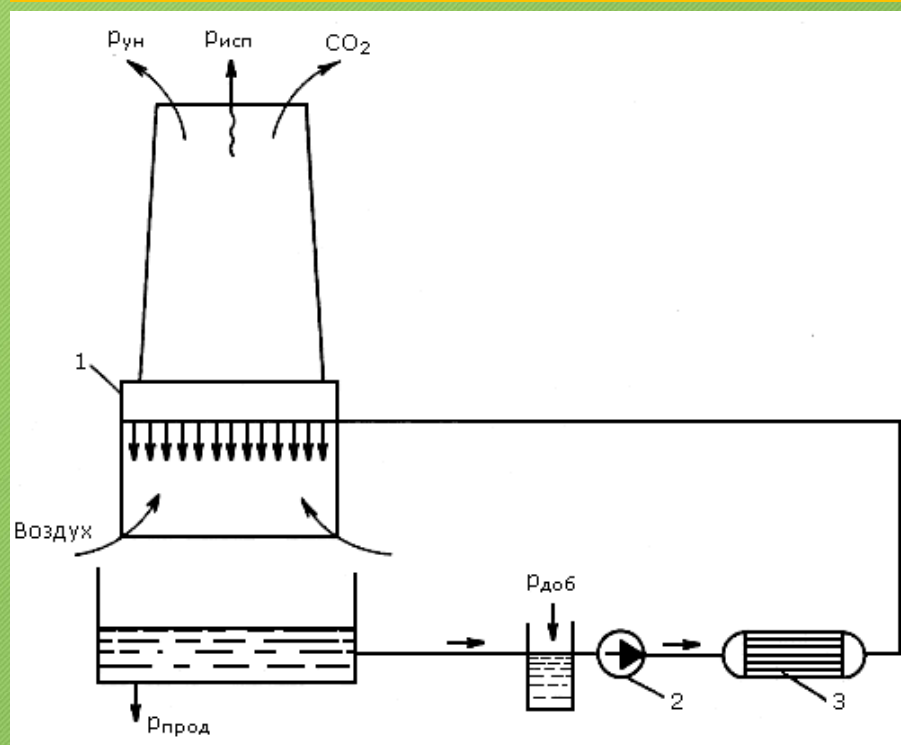


Схема оборотного охлаждения с градирней

1 - градирня; 2 - циркуляционный насос; 3 - конденсатор;
 $P_{исп}$, $P_{ун}$ - потери воды в градирне на испарение и унос; $P_{прод}$ - продувка оборотной воды; $P_{доб}$ - добавка в систему свежей воды

СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

7



СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

8

Наибольшее распространение (до 70%) получили системы оборотного охлаждения (СОО), в которых один и тот же объем воды используется многократно и требуется лишь небольшой добавок воды для восполнения потерь, сопутствующих охлаждающим устройствам. В градирнях или брызгальных бассейнах обратная вода снижает температуру за счет испарения части подогретой в конденсаторе воды и конвективного теплообмена при контакте с воздухом, затем вода вновь подается в теплообменники - конденсаторы. В градирнях часть обратной (охлаждающей) воды теряется за счет **капельного уноса и испарения**. Испаряемая влага является чистой водой, поэтому за счет испарения солесодержание воды в оборотной системе повышается. Регулирование солесодержания осуществляется методом водообмена с помощью **продувки системы**.

Продувка системы оборотного охлаждения - это отвод части охлаждающей воды с заменой её свежей.

$$P_{ун} = 0,05 - 3,5\%$$

$$P_{исп} = 1 - 1,5\%$$

$$P_{прод} = ????$$



СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

9

Баланс системы можно записать в следующем виде:

$$P_{\text{доб}} = P_{\text{исп}} + P_{\text{ун}} + P_{\text{прод}}$$

Для солей, не образующих трудно растворимых соединений при нагреве воды в системе охлаждения, баланс масс в установившемся режиме записывается в виде (**солевой баланс**):

$$C_{\text{доб}} P_{\text{доб}} = C_{\text{охл}} (P_{\text{ун}} + P_{\text{прод}})$$

$$C_{\text{доб}} P_{\text{доб}} = C_{\text{охл}} (P_{\text{доб}} - P_{\text{исп}})$$

где $C_{\text{доб}}$, $C_{\text{охл}}$ - концентрация соли (примеси) в добавочной и охлаждающей воде.

Отношение $C_{\text{охл}}/C_{\text{доб}}$, называемое **коэффициентом концентрирования** (k_k), определяется величиной потерь охлаждающей воды с продувкой и с капельным уносом (k_k также называют **коэффициентом упаривания**).

СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

10

Зависимость коэффициента концентрирования от величины продувки системы обратного охлаждения

Продувка системы обратного охлаждения, %	Коэффициент концентрирования, k_k	
	Градирни с каплеуловителями	Градирни без каплеуловителей
0	41,0	4,00
0,5	3,68	2,50
1,0	2,42	2,00
2,0	1,73	1,60
4,0	1,37	1,33
6,0	1,30	1,28

СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

11

Наряду с концентрированием легко растворимых солей в системах оборотного охлаждения (СОО) увеличивается в той же кратности **концентрация солей жесткости и гидрокарбонатов**. С ростом температуры воды в СОО интенсифицируется гидролиз HCO_3^- , что характеризуется уравнением вида:



Сдвигу реакции вправо, т.е. распаду ионов HCO_3^- и образованию CO_3^{2-} способствует также потеря образующегося при гидролизе диоксида углерода в градирне (аналогично процессу в декарбонизаторе). Эти факторы приводят к возможности выделения на теплообменной поверхности отложений CaCO_3 , т.е. потере **стабильности** охлаждающей воды. Сульфат кальция обладает сравнительно большой растворимостью при $t = 20 - 40^\circ\text{C}$ (около 1800 мг/дм^3) и поэтому редко встречается в составе низкотемпературных накипей.

Так как теплопроводность **кальциевых отложений** на порядок меньше теплопроводности металла конденсаторных трубок, с ростом толщины накипи на них повышается температура конденсации пара и снижается вакуум в конденсаторе. Ухудшение вакуума на **1%** требует увеличения расхода пара на **1,4%** для поддержания номинальной мощности энергоустановки. Таким образом, отложения в СОО приводят к значительному пережогу топлива при выработке электроэнергии.

Интересные факты:

1. Самая большая по производительности градирня в **мире** была возведена в _____ . Её высота равна 165 м, в диаметре 153 м, а её максимальная производительность равна **216 000** м³/ч.
2. Самая высокая башенная охлаждающая установка в **мире** построена в _____ в 2012 году. Высота охладительной башни равна 202 метрам. Но существует еще одна такая же башня в 202 метра. Построена она на той же ТЭЦ, но только на втором энергоблоке. Это башни-близнецы.
3. Самая высокая градирня в **России** построена в 2012 году и расположена на _____ АЭС. Градирня служит для охлаждения жидкости на первом энергоблоке. Высота башни равна 172,5 м.



ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЙ ОТЛОЖЕНИЙ

13

Для предотвращения образований **минеральных отложений** в конденсаторах в оборотных системах применяют:

- **продувка** системы оборотного охлаждения;
- **обработка** циркуляционной воды **реагентами** (подкисление, рекарбонизация, фосфотирование);
- **физическая обработка** воды в магнитном или акустическом полях.

Для предотвращения **биологических обрастаний** в системах охлаждения, которые являются идеальной средой для роста живых организмов, т.к. снабжаются кислородом, теплом, и светом:

- **обработка воды сильными окислителями** (хлорирование , обработка медным купоросом)

ПРОДУВКА СИСТЕМЫ ОБОРОТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

14

Существует **некоторое значение** предельно допустимой карбонатной жесткости

если	$J_{\text{охл}}^{\text{карб}} \leq J_{\text{к.пред}}$	ОТЛОЖЕНИЯ ОБРАЗОВАТЬСЯ НЕ БУДУТ
если	$J_{\text{охл}}^{\text{карб}} > J_{\text{к.пред}}$	ВОЗМОЖНО ВОЗНИКНОВЕНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ

Значения $J_{\text{к.пред}}$ обычно определяются опытным путем для конкретных условий работы СОО. На основе обобщения опытных данных для природных вод с окисляемостью до 25 мг·О₂ на 1 дм³ в интервале температур от 30 до 60°С можно записать **уравнение Крушеля**

$$2,8 J_{\text{к.пред}} = 8 + \frac{OK}{3} - \frac{t - 40}{5,5 - \frac{OK}{7}} - \frac{2,8 J_{\text{нк}}}{6 - \frac{OK}{7} + \left(\frac{t - 40}{10}\right)^3}$$

где ОК - окисляемость воды, мг·О₂/дм³, $J_{\text{нк}}$ - некарбонатная жесткость воды, мг-эquiv/дм³, t - максимальная температура воды в системе, °С (при t < 40°С в уравнение подставляют t = 40°С)

ПРОДУВКА СИСТЕМЫ ОБОРОТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

15

Так как основным назначением продувки является поддержание карбонатной жесткости циркуляционной воды ниже предельно допустимой величины ($J_{к.пред}$), значение требуемой продувки можно определить из уравнения **солевой баланс**

$$J_{к.пред}(P_{ун} + P_{прод}) = J_{к.доб}(P_{ун} + P_{исп} + P_{прод})$$

отсюда

$$P_{прод} = \frac{P_{исп} J_{к.доб}}{J_{к.пред} - J_{к.доб}} - P_{ун}$$

где $J_{к.доб}$ - карбонатная жесткость добавляемой воды на восполнение потерь в CO_2 , мг-экв/дм³; $P_{ун}$, $P_{исп}$ - потери воды в системе за счет уноса и испарения, %

Потери воды на испарение в градирнях, %, определяются

$$P_{исп} = 0,16 x \Delta t$$

где x - доля теплоты, отдаваемой охлаждающей водой за счет ее испарения в градирне (летом - 1,0 зимой - 0,5, весной и осенью - 0,75); Δt - снижение температуры в градирне.

ПРОДУВКА СИСТЕМЫ ОБОРОТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

16

Потери воды с капельным уносом

Тип охлаждающих устройств	Потери, %
Брызгальные бассейны производительностью более 400 м ³ /ч	1,5-2,5
Открытие градирни с решетками, жалюзи	1,0-3,0
Башенные градирни с площадью орошения до 150 м ²	0,5-1,0
Башенные градирни с площадью орошения более 150 м ²	0,5
Башенные градирни с площадью орошения более 150 м ² (с каплеуловителями)	0,05
Вентиляторные градирни с каплеуловителями	0,2-0,3

Потери воды в результате уноса каплей колеблется от 0,25 - 0,5 до 1,5 - 3,5% в зависимости от скорости ветра и типа градирни, а также зависят от наличия и эффективности работы брызгоуловителей в градирнях

ОБРАБОТКА ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ВОДЫ РЕАГЕНТАМИ

17

Подкисление циркуляционной воды проводится с целью частичного снижения $J_{\text{к}}$ до значения, равного или несколько ниже $J_{\text{к.пред}}$ с использованием H_2SO_4 в качестве наиболее дешевого и доступного реагента. Введенная в воду кислота разлагает гидрокарбонат кальция по реакции



В дополнение к разрушению потенциального накипеобразователя $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ при подкислении выделяется CO_2 , который стабилизирует оставшуюся часть гидрокарбоната кальция ($J_{\text{к.ост}}$). Последний служит буфером, предохраняющим систему от переокисления воды и соответственно от интенсификации коррозии. $J_{\text{к.ост}}$ находится из соотношения:

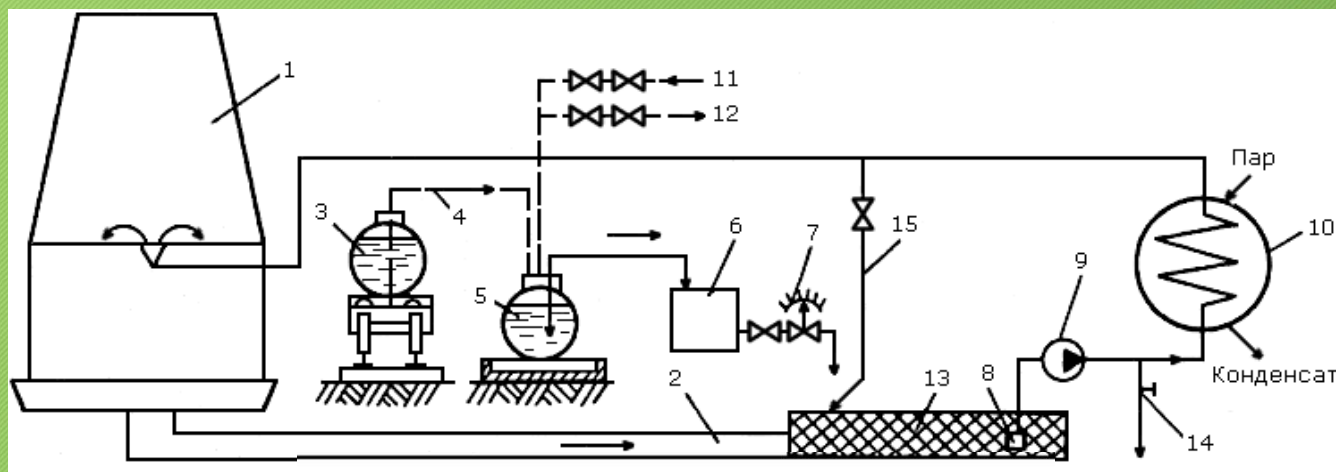
$$J_{\text{к.ост}} = J_{\text{к.пред}} \frac{P_{\text{прод}} + P_{\text{ун}}}{P_{\text{прод}} + P_{\text{ун}} + P_{\text{исп}}}$$

В результате подкисления образуется **гипс** (CaSO_4), поэтому необходимо выполнять **продувку**.

ОБРАБОТКА ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ВОДЫ РЕАГЕНТАМИ

18

Схема подкисления циркуляционной воды



- 1 - градирня;
- 2 - канал;
- 3 - ж/д цистерна;
- 4 - сифонный слив;
- 5 - приемный резервуар для кислоты;
- 6 - расходный бак
- 7 - дозирующий кран;
- 8 - приемный клапан;
- 9 - циркуляционный насос;
- 10 - конденсатор;
- 11 - сжатый воздух;
- 12 - вакуум;
- 13 -кислотоупорное покрытие канала и приемного колодца;
- 14 - отбор проб;
- 15 -циркуляционная вод



ОБРАБОТКА ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ВОДЫ РЕАГЕНТАМИ

19

E452
Натрий
гексаметафосфат

Найдите ОДИН НЕВЕРНЫЙ ответ

1. Участвует в создании тромбоцитов, частично регулируя свертываемость крови.
2. Убивает бактерии, вырабатывающие крайне опасный ботулотоксин.
3. Является высоко токсичным веществом, при его концентрации выше 40% он горюч, поэтому при работе с ним должны предусматриваться специальные строгие меры безопасности.
4. Применяется в зубных пастах — для уменьшения зубного налета и камня, защиты от воздействия кислот.
5. Используется для смягчения воды, уменьшения накипи, защиты от коррозии, продления срока службы котлов и трубопроводов в различных системах водоснабжения.



ОБРАБОТКА ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ВОДЫ РЕАГЕНТАМИ

20

Фосфатирование охлаждающей воды в СОО производится с целью торможения процесса образования твердой фазы CaCO_3 , фосфаты тормозят их дальнейший рост, увеличивают допустимую степень пресыщения раствора и тем самым стабилизируют вод.

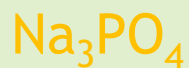
Для этих целей используют



Гексаметафосфат натрия



Триполифосфат натрия



Тринатрий фосфат

Фосфаты не стабильны и утрачивая свою стабильную функцию, дают $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ - фосфорит, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_3 \text{OH}$ – гидроксилapatит. Соединения выводятся в виде шлама, поэтому фосфатирование сопровождается продувкой.

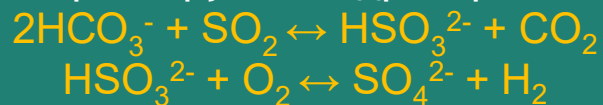
ОБРАБОТКА ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ВОДЫ РЕАГЕНТАМИ

22

Рекарбонизация – процесс насыщения воды углекислым газом, целью предотвращения процесса гидролиза гидрокарбонатов с образованием иона CO_3^{2-} можно добиться методом восполнения десорбированного в градирне CO_2 до равновесного значения его в охлаждающей воде. Так как стабилизация воды в этом случае происходит в результате, процесс называется рекарбонизацией воды.

В качестве источника CO_2 на ТЭС используют продукты сгорания топлива. Отметим, что при рекарбонизации не происходит заметного увеличения солесодержания воды, что упрощает сброс продувочной воды СОО в естественные водоемы.

Продукты сгорания топлива содержат CO_2 , SO_2 , азот и кислород. Сернистый газ хорошо растворяется в воде и реагирует с гидрокарбонатами с образованием CO_2



Как видно, в этой технологии количество сульфатов в воде возрастает при эквивалентном снижении карбонатной жесткости (**подобно процессу подкисления**) и увеличении ее некарбонатной части



ОБРАБОТКА ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ВОДЫ РЕАГЕНТАМИ

23

Необходимый расход дымовых газов, $\text{нм}^3/\text{ч}$ может быть определен по формуле:

$$G_{\Gamma} = \frac{5,1 \Delta C_{\text{CO}_2} Q_{\text{охл}}}{\beta C_{\text{CO}_2}}$$

где ΔC_{CO_2} – необходимое увеличение концентрации CO_2 в охлаждающей воде, $\text{мг}/\text{дм}^3$; β – степень использования углекислоты, %; C_{CO_2} – концентрация углекислоты в дымовых газах, %.

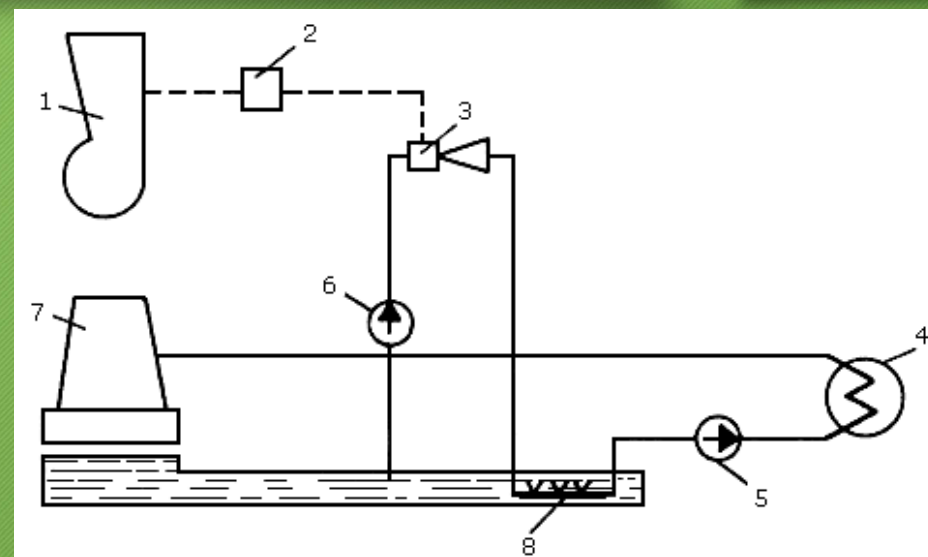


Схема рекарбонизации воды дымовыми газами

1 – дымосос; 2 – золоуловитель; 3 – водоструйный эжектор; 4 – конденсатор; 5 – циркуляционный насос; 6 – насос подачи воды к эжектору; 7 – градирня; 8 – барботажное устройство

ОБРАБОТКА ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ВОДЫ РЕАГЕНТАМИ

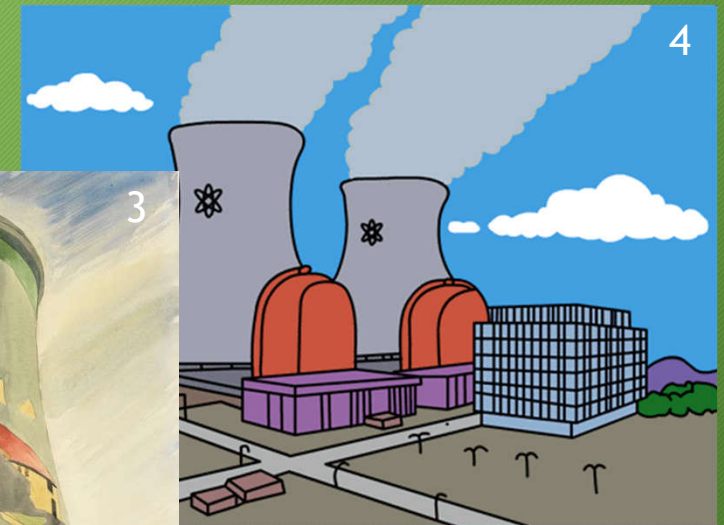
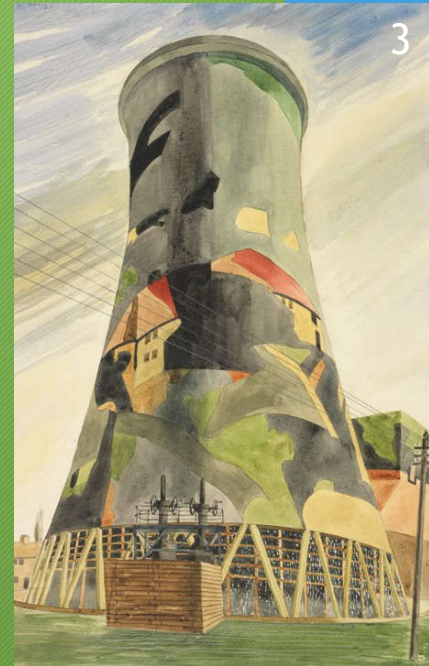
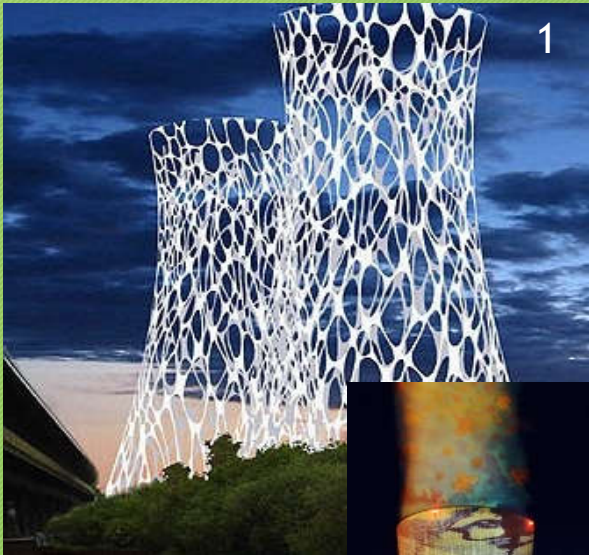
24

Рекомендации по выбору схемы стабилизации охлаждающей воды

$J_{к.пред}$, мг-экв/дм ³	Способ стабилизации
3,0-3,5	<i>фосфатирование + продувка системы</i>
3,5-4,5	<i>рекарбонизация + фосфатирование + продувка системы</i>
>4,5	<i>подкисление + фосфатирование + продувка системы</i>

СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ И ИСКУССТВО

25



ФИЗИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ

26

Магнитная обработка воды производится в аппаратах, в которых поток охлаждающей воды пересекает силовые линии **магнитного поля**, напряженностью до **105 А/м**, создаваемое электромагнитной катушкой или постоянными магнитами. Несмотря на то, что теоретические основы воздействия магнитного поля на воду и ее примеси до сих пор не разработаны, экспериментально установлено, что при наложении магнитного поля на нестабильную по карбонату кальция воду, содержащую ферромагнитные примеси (Fe_3O_4 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), происходит снижение интенсивности образования отложений на теплопередающих поверхностях. Механизм магнитной обработки объясняется агрегатированием ферромагнитных оксидов железа до размеров больше критических для данного пересыщения раствора и образованию на этих затравочных кристаллах отложения кристаллизующейся соли. Накопленный промышленный опыт эксплуатации магнитных аппаратов для стабилизационной обработки охлаждающей воды на ряде ТЭС характеризуется различной эффективностью, что не позволяет рекомендовать эту технологию для широкого использования без предварительного получения результатов на пилотной установке.

ОБРАБОТКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ СИЛЬНЫМИ ОКИСЛИТЕЛЯМИ

27



Повышение температуры воды в системах охлаждения, наличие питательных веществ и кислорода являются причиной интенсивного развития в охлаждающей воде бактерий, грибов и водорослей различных видов. При окисляемости воды выше $10 - 15 \text{ мг} \cdot \text{O}_2 / \text{дм}^3$ биологические образования в форме слизистых отложений формируются наиболее интенсивно.

Для борьбы с **биообрастаниями**, приводящими к ухудшению вакуума в конденсаторах и интенсификации коррозионных процессов, применяют обработку охлаждающей воды сильными окислителями, такими, как **хлор** и его производные, а также медьсодержащими солями. Механизм бактерицидного действия молекулярного хлора и его производных заключается в окислении ферментов клетки с последующим отмиранием микроорганизмов.

ОБРАБОТКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ СИЛЬНЫМИ ОКИСЛИТЕЛЯМИ

28

Для борьбы с **твердыми ракушечными обрастаниями** в системах хлорирование охлаждающей воды недостаточно эффективно. В этих случаях применяют **медный купорос $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$** с дозой ионов меди около 1 - 2 мг/дм³. Ионы меди, взаимодействуя с цитоплазмой клеток, приводят к их гибели.

Положительные результаты в борьбе с ракушечными обрастаниями дает применение **катодной защиты** путем подвешивания на изоляторах по оси трубопровода стального стержня - анода диаметром 30 - 40 мм, к которому подведен постоянный ток.

Плотности тока на катоде (трубопроводе) в летний период должна составлять 0,4 - 0,6 А/м², в зимний период - 0,16 - 0,25 А/м².



ОБРАБОТКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ СИЛЬНЫМИ ОКИСЛИТЕЛЯМИ

29

Для удаления мягких, илистых биологических отложений - обрастаний в конденсаторных трубках может применяться очистка трубок "на ходу" **монолитными резиновыми шариками** плотностью 1 г/см^3 с диаметром, равным внутреннему диаметру конденсаторных трубок. Число циркулирующих шариков, загружаемых во входную камеру, составляет 10% от числа трубок в конденсаторе. Шарик захватывается потоком воды, проходит с ним по трубкам и счищает отложения. В выходной камере конденсатора шарики задерживаются сетками и эжекторами вновь транспортируются во входную камеру. Система включается автоматически при включении в работу насоса с периодичностью, определяемой степенью загрязнения трубок и качеством охлаждающей воды.

