

Высоцкий С.П., д.т.н.<sup>1</sup>, Недопекин Ф.В., д.т.н.<sup>2</sup>

1 — АДИ ГВУЗ «ДонНТУ», г. Горловка; 2 — ДонНУ, г. Донецк

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЫ В ОБОРОТНЫХ ЦИКЛАХ

*На основании анализа процессов переноса тепла и накипеобразования приведен анализ факторов, влияющих на интенсивность накипеобразования в установках с высокими тепловыми потоками. На примере кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок обоснованы требования к конструкционным материалам и к качеству охлаждающей воды.*

### **Введение**

Увеличение техногенной нагрузки на гидросферу, дефицит и значительное повышение стоимости пресной воды способствовали переводу последней в статус исчерпаемых природных ресурсов. Это вызвало необходимость повторного использования воды и внедрения замкнутых систем водоснабжения.

В замкнутых системах вода используется преимущественно как теплоноситель для диссипации (рассеивания) тепловой энергии в энергетических, металлургических и химических производствах и для передачи — транспортирования энергии в системах теплоснабжения и генерации электрической энергии на тепловых и атомных электростанциях.

Условия использования воды и технологические схемы оборотных циклов изменяются в зависимости от тепловых потоков. Последние, в свою очередь, вызывают необходимость дифференцирования требований к качеству технологической воды, которая используется в оборотных циклах. Так, например, в системах подготовки для подпитки тепловых сетей качество воды нормируется по так называемому карбонатному индексу — произведению кальциевой жесткости на щелочность воды [1].

В дальнейших исследованиях [2-4] было показано, что зависимость интенсивности накипеобразования, как одного из основных эксплуатационных факторов, влияющих на перенос тепла, имеет более сложный характер.

Особую сложность представляет оценка требования к качеству воды в технологических установках при высоких плотностях тепловых потоков.

Так, например, некоторые технологические установки работают при отводе тепла от расплава металла в кристаллизаторах или при отводе тепла ядерного распада в реакторах АЭС. При этом скорость отводящей тепло воды в зазоре составляет до 14 м/с. Любые отложения, даже небольшой толщины, которые для обычных теплообменных аппаратов являются допустимыми, в условиях работы кристаллизаторов существенно влияют на теплоотвод. При этом изменяются не только условия отвода тепла, но и интенсивность коррозионных процессов, а также структура потока. Все три параметра являются взаимосвязанными.

**Целью работы** является обоснование требований к качеству охлаждающей воды в оборотных системах водоснабжения при высокой интенсивности тепловых потоков.

### **Анализ факторов, влияющих на интенсивность накипеобразования**

По данным исследований, выполненных во Всесоюзном теплотехническом институте для высоконапряженных поверхностей нагрева, интенсивность образования отложений описывается следующим уравнением:

$$A = K C q^2, \quad (1)$$

где  $A$  — интенсивность образования отложений, г/м<sup>2</sup>·ч;

$C$  — концентрация соединений, переходящих в накипь, мг/кг;

$q$  — плотность теплового потока,  $\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ .

По данным исследований, выполненных на котлах в промышленных условиях,  $K = 8,3 \cdot 10^{-13}$  [5].

Для плоской теплопередающей стенки меди в кристаллизаторе уравнение теплообмена при наличии пленки отложений на поверхности этого металла будет иметь следующий вид:

$$q = \frac{\Delta t}{\frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{\delta_{oml}}{\lambda_{oml}} + \frac{1}{\alpha}}, \quad (2)$$

где  $\Delta t$  — разность температур между стенкой и потоком воды,  $K$ ;

$\lambda_{cm}, \lambda_{oml}$  — коэффициент теплопроводности стенки и отложений,  $\text{ккал}/\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$  ( $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{K}$ );

$\delta_{cm}, \delta_{oml}$  — толщина теплопередающей стенки меди и отложений,  $\text{м}$ ;

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи,  $\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$  ( $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{K}$ );

$q$  — тепловое напряжение,  $\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ .

При прочих равных условиях ( $\delta_{cm}, \lambda_{cm}, \delta_{oml}, \lambda_{oml}, \alpha = \text{const}$ ), а также постоянной скорости потока охлаждающей воды, скорость образования отложений пропорциональна квадрату разности температур между стенкой и потоком воды и, исходя из равенства потоков подведенного и отведенного тепла — пропорциональна квадрату разности температур воды на входе и выходе из кристаллизатора. Таким образом, при повышении разности температур от  $10^\circ\text{C}$  до  $14^\circ\text{C}$  количество отложений увеличивается примерно в 2 раза.

Надежный контроль превышения температуры охлаждающей воды после кристаллизатора является защитой как от прогрессирующего отложения накипи, так и, как будет показано ниже, от коррозии металла в результате возникновения электрохимических пар дифференциальной аэрации.

Для определения параметров процесса теплоотдачи в каналах кристаллизатора определяем значение критерия Рейнольдса при характерном линейном размере " $d_3$ ":

$$d_3 = \frac{4f}{\Pi}, \quad (3)$$

где  $f$  — площадь поперечного сечения потока;

$\Pi$  — полный периметр сечения потока, независимо от того, какая часть этого периметра участвует в теплообмене.

Нетрудно убедиться, что для кольцевых или прямоугольных зазоров между двумя стенками — внутренней и наружной

$$d_3 = 2\delta, \quad (4)$$

где  $\delta$  — ширина зазора между стенками.

Для нашего конкретного случая течения в кристаллизаторе  $d_3 = 7 \cdot 10^{-3}$  м.

Критерий Рейнольдса для условий течения потока в кристаллизаторе равен

$$\text{Re} = \frac{W d_3 \rho}{\mu} = \frac{W d_3}{\nu} = \frac{14 \cdot 7 \cdot 10^{-3}}{0,66 \cdot 10^{-6}} = 1,48 \cdot 10^5. \quad (5)$$

Значение  $\mu$  принято для температуры  $40^\circ\text{C}$ . Таким образом, в канале кристаллизатора существует развитое турбулентное течение ( $\text{Re} \gg 10000$ ). Коэффициент теплоотдачи от медной стенки может быть найден по формуле

$$\text{Nu} = 0,021 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43} \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{cm}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_L, \quad (6)$$

где  $\text{Nu} = \alpha d_3 / \lambda$ ;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $Вт/м \cdot К$ .

Коэффициент теплопроводности представлен в таблице 1.

Таблица 1

## Коэффициенты теплопроводности некоторых металлов и сплавов

| Металл, сплав     | Плотность, $кг/м^3$ | Коэффициент теплопроводности, $Вт/м \cdot К$ |
|-------------------|---------------------|--|
| Алюминий          | 2700                | 203,5  |
| Бронза            | 8000                | 64,0   |
| Латунь            | 8500                | 93,0   |
| Медь              | 8800                | 384  |
| Свинец            | 11400               | 34,9   |
| Сталь             | 7850                | 46,5   |
| Сталь нержавеющая | 7900                | 17,5   |
| Чугун             | 7500                | 46,5-93                                      |

Из таблицы видно, что  $\lambda$  меди в 8,25 раз превосходит  $\lambda$  стали и почти в 22 раза  $\lambda$  нержавеющей стали. Это объясняет необходимость изготовления стенки кристаллизатора из меди.

Для нагреваемой воды  $\left(\frac{Pr}{Pr_{cm}}\right)^{0,25} = 1$ , где  $\frac{Pr}{Pr_{cm}}$  учитывает направление теплового потока. Учитывая то, что отношение длины хода потока  $L$  к характерному линейному размеру  $d_3$ ,  $\frac{L}{d_3} = \frac{1000}{7} \approx 143$ , т.е.  $\gg 50$ , то поправочный коэффициент  $\varepsilon_L = 1$ .

Для температуры  $40^\circ C$  значение критерия Прандтля равно  $Pr = 4,6$ . Таким образом, критерий Нуссельта будет равен

$$Nu = 0,021 \cdot (1,34 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 4,6^{0,43} = 511,5.$$

Отсюда, коэффициент теплоотдачи равен

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{d_3} = \frac{511,5 \times 384}{7 \cdot 10^{-3}} = 2,8 \cdot 10^7 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}.$$

**Обоснование требований к качеству охлаждающей воды**

Принимая во внимание то, что при работе оборотной системы на воде, содержащей катионы карбонатной жесткости, может происходить накипеобразование в результате подогрева воды и смещения равновесия реакции  $Ca(HCO_3)_2 \rightleftharpoons CaCO_3 \downarrow + CO_2 \uparrow + H_2O$  в правую сторону, необходимо оценить интенсивность образования отложений и определить меры, как для ее снижения, так и для минимизации коррозионных процессов. Коррозионные процессы также могут приводить к образованию отложений продуктов коррозии на теплопередающих поверхностях. Интенсивность образования отложений связана с толщиной отложений и временем работы оборудования следующим образом:

$$V_{отл} = \rho \frac{\delta_{отл}}{\tau}, \quad (7)$$

где  $\rho$  — плотность отложений,  $г/м^3$ ;

$\tau$  — продолжительность эксплуатации оборудования, ч.

Подставляя значение  $\delta_{отл}$  из (2) в (7), получаем

$$V_{омл} = \rho_{омл} \frac{\lambda_{омл}}{\tau} \left( \frac{\Delta t}{q} - \frac{\delta_{cu}}{\lambda_{cu}} - \frac{1}{\alpha} \right), \quad (8)$$

где  $\lambda_{омл}$  — коэффициент теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности для карбонатных накипей равен  $1,163 \div 3,49 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ , а для железистых  $1,16 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ . Принимаем  $\lambda_{омл} = 1,16 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ . Плотность накипи  $\rho$  оцениваем по справочным данным  $2 \cdot 10^6 \text{ г/м}^3$ . Минимально допустимое значение  $\tau$ , очевидно, не должно быть ниже  $8500 \text{ ч}$ . Предполагается, что промывка оборудования от отложений должна производиться не чаще одного раза в год.

Значение  $\Delta t$  — разница температур между предельно допустимой температурой медной стенки кристаллизатора  $350 \div 400 \text{ }^\circ\text{C}$  и максимальной температурой охлаждающей воды  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

$$\Delta t = 350^\circ - 50^\circ = 300^\circ\text{C}.$$

Значение  $q$  определяем по обратному балансу из паспортных значений степени подогрева воды в кристаллизаторе:

$$q = W F \rho_e (t_{вых} - t_{вх}) C \cdot 3600 = 14 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 (45 - 35) \cdot 3600 = 1,95 \cdot 10^6 \text{ ккал/ч} = 1,68 \cdot 10^6 \text{ Вт},$$

$$\begin{aligned} V_{омл} &= 2 \cdot 10^6 \cdot \frac{1,16}{8500} \left( \frac{300}{1,68 \cdot 10^6} - \frac{8 \cdot 10^{-3}}{384} - \frac{1}{2,8 \cdot 10^7} \right) = \\ &= 2,73 \cdot 10^2 (1,78 \cdot 10^{-4} - 0,21 \cdot 10^{-4} - 3,5 \cdot 10^{-8}) \approx 0,043 \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч} = 43 \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч} \end{aligned}$$

В этом случае предельная толщина накипи после одного года эксплуатации оборудования составит  $0,18 \text{ мм}$ .

Интересно проследить, как изменяется допустимая скорость накипеобразования и "критическая" толщина отложений при замене материала корпуса на нержавеющую сталь вместо меди. В этих условиях

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \lambda_{cm}}{d_s} = \frac{511,5 \cdot 17,5}{7 \cdot 10^{-3}} = 1,28 \cdot 10^6.$$

Уменьшение коэффициента теплоотдачи практически не скажется на интенсивности накипеобразования.

Применение нержавеющей стали позволяет повысить температуростойкость примерно до  $560 \text{ }^\circ\text{C}$  и в результате увеличения прочности снизить толщину стенки в  $1,4-1,5$  раза.

Допустимая скорость накипеобразования при этом составит

$$\begin{aligned} V_{омл} &= 2,73 \cdot 10^2 \left( \frac{560}{1,68 \cdot 10^6} - \frac{5,5 \cdot 10^{-3}}{17,5} - \frac{1}{1,28 \cdot 10^6} \right) = 2,73 \cdot 10^2 (3,27 \cdot 10^{-4} - 3,14 \cdot 10^{-4}) = \\ &= 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч} = 3,5 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{ч}. \end{aligned}$$

Предельная толщина накипи после одного года эксплуатации составит  $14,9 \text{ мкм}$ . Указанный режим работы практически нереален.

Следовательно, замена меди в кристаллизаторе на нержавеющую сталь, что было бы желательно для уменьшения контактной разности потенциалов и снижения интенсивности коррозионных процессов, не позволяет обеспечить надежную работу кристаллизатора без тщательной очистки циркуляционной воды в контуре. При этом, по-видимому, потребовалась бы как глубокая очистка подпиточной, так и непрерывная очистка циркуляционной воды от продуктов коррозии в патронных фильтрах.

С учетом обеспечения надежности работы оборудования принимаем вклад карбоната кальция в общее количество отложившихся солей  $50 \%$ . При длительности межпромывоч-

ного периода работы кристаллизатора в 3 года или при другом временном отрезке в 5 лет, допустимая скорость накипеобразования составит соответственно  $\sim 7 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{ч}$  и  $4,3 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{ч}$ .

Так как скорость накипеобразования в зависимости от температуры нагрева жидкости, ее жесткости и щелочности определяется по формуле [3]:

$$V_{отл} = 9,85 \cdot 10^{-4} e^{0,02t} e^{0,5Ж \cdot Щ}, \quad (9)$$

где  $Ж, Щ$  — кальциевая жёсткость и щёлочность охлаждающей воды,  $\text{мг} \cdot \text{экв} / \text{кг}$ , то допустимые значения жесткости и щелочности воды могут быть найдены при условии подгрева воды до  $50^\circ\text{C}$ :

$$2 \ln \frac{V_{отл}}{9,85 \cdot 10^{-4} e^{0,02t}} \geq ЖЩ. \quad (10)$$

Подставляя соответствующие значения  $V_{дон}$  и  $t$  ( $^\circ\text{C}$ ), получаем:

$$Ж \cdot Щ \leq 2 \ln \frac{7 \cdot 10^{-3}}{9,85 \cdot 10^{-4} \cdot 2,72} = 1,9 (\text{мг} \cdot \text{экв} / \text{кг})^2.$$

Для 5-летней рабочей кампании:

$$Ж \cdot Щ \leq 2 \ln \frac{4,3 \cdot 10^{-3}}{9,85 \cdot 10^{-4} \cdot 2,72} = 0,95 (\text{мг} \cdot \text{экв} / \text{кг})^2.$$

Последнее значение может быть принято в качестве нормируемой величины для указанного выше значения теплового потока.

### **Выводы**

1. Дефицит и увеличение стоимости воды вызывают необходимость применения замкнутых систем водоснабжения с многократным использованием воды.

2. Технологические схемы оборотных циклов и тепловые потоки в установках использования воды для охлаждения вызывают необходимость дифференцирования требований к качеству технологической воды.

3. В современных технологических процессах: в металлургии — в установках непрерывной разливки стали, в реакторах атомных электростанций существуют высокие тепловые потоки, что вызывает необходимость применения весьма "жестких" норм к качеству циркулирующей воды.

4. На основании анализа моделей процессов переноса тепла обоснованы требования к конструкционным материалам и к качеству воды, используемой в оборотных циклах при высоких уровнях тепловых потоков.

### **Список литературы**

1. Правила эксплуатации тепловых электростанций и сетей. — М.: Энергоиздат, 1989. — 288 с.
2. Высоцкий С.П. Надежность работы систем теплофикации и технология обработки подпиточной воды / С.П. Высоцкий, Д.Н. Бут // Сантехніка, опалення, кондиціонування (СОК). — К.: Медіа Технолоджи, 2007. — № 7. — С. 12-15.
3. Висоцький С.П. Накипоутворення в теплофікаційних системах / С.П. Висоцький, Г.В. Фаткуліна // Вісник Донбаської національної академії будівництва та архітектури. Інженерні системи та техногенна безпека. — 2009. — № 2. — С. 99-105.
4. Закономерности накипеобразования в водогрейном оборудовании систем теплоснабжения / Ю.В. Балабан-Ирменин, А.В. Богловский, Л.Г. Васина, А.М. Рубанов // Энергосбережение и водоподготовка. — 2004. — № 3. — С. 10-16.
5. Стырикович М.А. Процессы генерации пара на электростанциях / М.А. Стырикович, О.И. Мартынова, З.Л. Миропольский. — М.: Энергия, 1969.
6. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / под общ. редакцией В.А. Григорьева и В.М. Зорина. — М.: Энергоиздат., 1982. — 610 с.

Стаття надійшла до редакції 12.10.09  
© Висоцький С.П., Недопьокін Ф.В., 2009