

екстракції «Екстракція в гідрометалургії, радіохімії, технології неорганічних і органічних речовин». – М. – 2004. – С. 231 – 232.

9. *Макаренко І.М.* Оцінка впливу іонів твердості на ефективність очищення води від іонів міді / І.М. Макаренко, Ю.В. Носачова, О.І. Іваненко // Вісник НТУУ «КНУ». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2014. № 1 (12). – С. 54 – 59.

10. *Пиккеринг У.Ф.* Современная аналитическая химия. – М. «Химия». – 1977. – 560 с.

Надійшло до редакції 12.04.2016

УДК 628.13: 164: 171: 179

А.Н. НАЗАРЕНКО, кандидат технічних наук

И.С. ЛОЙКО, магістрант

Запорожская государственная инженерная академия

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ОТЛОЖЕНИЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОММУНИКАЦИЯХ

Запропонована концепція визначення величини відкладень у трубопроводах для зменшення раптових перерв в роботі основного обладнання. Наведено методіку розрахунку концентрації домішок та оцінки їх впливу на циркуляційну воду для запобігання відкладенням у трубопроводах.

Ключові слова: жорсткість, водно-хімічний режим, інтенсивність утворення відкладень, моніторинг, стабільність води.

Предложена концепция определения величины отложений в трубопроводах для снижения простоя основного оборудования.. Предложена методика, расчета концентраций примесей и оценки их влияния на циркулирующую воду для предотвращения отложений в трубопроводах.

Ключевые слова: жесткость, водно-химический режим, интенсивность образования отложений, мониторинг, стабильность воды.

The conception of determining the value of sediments in pipes and reduce downtime of equipment is proposed. The conceptions contains a number of measures for the calculation of concentrations of contaminants and assess their impact on the circulating water and prevent sediments in pipes

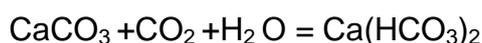
Keywords: hardness, water chemistry, intensive formation, monitoring, water stability.

Образование плотных солевых отложений, в первую очередь карбонатных в системах водоснабжения мокрых газоочисток металлургических производств является сложным физико-химическим процессом. Интенсивность таких отложений и зависит от их химического состава отложений и от конструктивных особенностей очистных сооружений [1].

Об особенностях и сложности определения факторов, влияющих на процесс образования солевых отложений, свидетельствуют многие из проведенные исследования оборотных циклов водоснабжения газоочисток доменных печей. Проведенные авторами ряд исследований позволили отметить, что интенсивное отложение карбонатных солей наблюдается преимущественно в нижней части скрубберов, оросителях в градирнях и запорной арматуре. В результате образования отложений падает охладительный эффект градирен, снижается эффективность работы трубопроводов, выходит из строя запорная и регулирующая арматура [2, 3].

Карбонатные отложения образуются при распаде солей карбонатной жесткости. Процесс проходит в **два этапа**.

На **первом этапе** карбонатный ион в условиях повышенного давления в трубопроводе переходит в бикарбонатную двуокись углерода доменного газа, содержание которого составляет 17...19%.



Теоретическое количество растворенной углекислоты C_{CO_2} (мг/л) может быть получено по формуле

$$C_{\text{CO}_2} = r_{\text{CO}_2} \times P_{\text{CO}_2} / 760, \quad (1)$$

где r_{CO_2} – растворимость углекислоты (мг/л) при ее парциальном давлении 760 мм рт.ст. и определенной температуре воды (например, для $t = 60^\circ\text{C}$ $r_{\text{CO}_2} = 580$ мг/л); P_{CO_2} – парциальное давление углекислоты (мм рт.ст.).

$$P_{\text{CO}_2} = C_{\text{CO}_2} \times P_{\text{газа}} / 100\%; \quad (2)$$

C_{CO_2} – концентрация углекислоты в газе, (%); $P_{\text{газа}}$ – давление газа в скруббере, (мм рт.ст.).

Полное давление газа в скруббере в процессе исследований было равно 0,1502 Мпа (1141,5 мм рт.ст.).

Парциальное давление углекислого газа в колошниковом газе в этом случае составляет

$$P_{\text{CO}_2} = 0,175 \times 1141,5 = 199,76 \text{ мм рт.ст.} \quad (3)$$

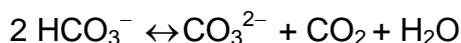
Теоретическая концентрация растворенного углекислого газа в такой воде составляет

$$C_{\text{CO}_2} = \frac{580 \times 199,76}{760} = 152,45 \text{ мг/л.} \quad (4)$$

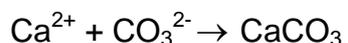
При выходе из скрубберов давление понижается до атмосферного, а концентрация углекислого газа в шламовой воде снижается примерно до 100 мг/л. Аналитически определенная концентрация углекислого газа, в среднем составляет 72,3 мг/л. Следует отметить, что в определенные

периоды (например, за 21.05.2015) концентрация CO₂ достигала 92,66 мг/л, то есть была близка к теоретическому значению.

При определенных уровнях температуры, давления и pH устанавливается фактическое равновесие содержащейся в воде углекислотных соединений



На **втором этапе** при выходе сточных вод из газоочистных сооружений в открытые шламовые лотки, при условии углекислотного равновесия – падает абсолютное давление, температура и парциальное давление. При этом, вследствие выделения в атмосферу свободной углекислоты, общее равновесие сдвигается вправо. В результате сдвига кислотного равновесия начинается разложение бикарбонатных ионов с образованием карбонатных ионов и двуокиси углерода, происходит довосстановление равновесия. Выделившаяся при распаде бикарбонатных ионов углекислота улетучивается, а избыток карбонатных ионов вступает в реакцию с ионами кальция.



Образовавшийся карбонат кальция осаждается на контактирующей с водой поверхностях как трубопроводов, так и очистных сооружений, а также на взвешенных веществах, являющихся в данном случае центрами кристаллизации.

Приведенный выше механизм образования карбонатных отложений дан в самой упрощенной форме. Однако, вышеуказанные реакции могут выступать основой для понимания процессов образования отложения при разработке способов их предотвращения в системах оборотного водоснабжения.

Следует отметить, что для систем *охлаждения* оборудования, концентрация взвешенных веществ не играет существенной роли для кристаллизации карбоната кальция, поскольку разработаны и применяются достаточно эффективные способы борьбы с отложениями.

Однако для систем с *технологическим приростом солей* и наличием взвешенных веществ, применение указанных способов не всегда обосновано; в каждом конкретном случае требуется проведение специальных физико-химических исследований для разработки эффективных способов предотвращения солевых отложений в условиях перевода систем водоснабжения на замкнутый режим работы без сброса сточных вод в открытые водоемы.

Для оценки состояния системы необходимо по аналитическим уравнениям рассчитать равновесные концентрации определяемых компонентов системы. Практически рассчитывается равновесная концентрация свободной двуокиси углерода, при различных концентрациях кальция и гидрокарбонатов в зависимости от физических условий (температура, давление) и химического состава воды. Авторами были проведены расчеты по известными методиками с некоторыми изменениями.

Расчет интенсивности отложений карбоната кальция в оборотном цикле водоснабжения.

По данным ряда исследования [4,5] наибольшая интенсивность отложений карбоната кальция в оборотных циклах наблюдается на участке от очистных сооружений до градирни.

Согласно расчетам авторов, в трубопроводе от безнапорных циклонов до вентиляторной градирни из оборотной воды в осадок выпадает в среднем избыток карбоната кальция в количестве 6,5 г/м (0,0065 кг/м). Время пребывания воды на этом участке составляет около 3 мин. За это время при расходе потока порядка 3180 м³/ч смесь проходит по трубопроводу расстояние около 69,3 м. В осадок выпадает карбонат в количестве $m = 0,0065 \times 69,3 = 451$ г (0,451 кг).

При площади внутренней поверхности трубопроводов порядка 603 м² удельная интенсивность отложений (ИО) составит:

$$\text{ИО} = 0,451 / 603 = 7,47 \times 10^{-4} \text{ кг/м}^2. \quad (5)$$

При перерасчете на период в 1 час рассчитанная величина составит:

$$\text{ИО} = 7,47 \times 10^{-4} \times 60 / 1,3 = 0,034 \text{ кг/м}^2 \times \text{ч} \quad (34,52 \text{ г/м}^2 \times \text{ч}). \quad (6)$$

При удельном весе карбоната кальция 2,7 г/см³ высота слоя годовых отложений составит:

$$h = \frac{34,52}{2,7 \times 10^{-4}} \times 8760 = 112 \text{ см/год},$$

где 8760 ч – расчетная длительность работы оборотного цикла в течение года.

Однако, при просмотре состояния внутренней поверхности трубопровода через год работы был обнаружен слой карбоната кальция толщиной 0,4 см (то есть фактически почти на порядок меньше).

По мнению авторов, такое расхождение между *теоретическим* и *фактическим* результатом может быть связано с **особой** ролью в процессах кристаллизации карбоната наличия в циркуляционной воде **взвешенных веществ**. Такого же мнения придерживаются, например, и авторы [4,5]. Ими было предложено для предотвращения карбонатных отложений вводить в оборотные циклы искусственно приготовленные зернистые присадки. В описанном нами случае роль таких присадок могут выполнять **взвешенные частицы** [5]. Далее приведены наши расчеты, подтверждающие такое предположение.

По данным наших расчетов, масса взвешенных веществ в осветленной воде после гидроциклонов в расчете на 1 м длины трубопровода составляет около 192 г/м (0,192 кг/м). Средний эквивалентный диаметр частиц взвеси составляет порядка 20 микрон (2 × 10⁻³ см = 2 × 10⁻⁶ м).

Тогда вес одной такой частицы составит порядка:

$$M = \frac{1}{6} \pi d_3^3 \gamma = \frac{1}{6} \times 3,14 \times (2 \times 10^{-3})^3 \times 2 = 8,04 \times 10^{-9} \text{ г}, \quad (7)$$

где γ – удельный вес взвешенной частицы (около 2 г/см³).

За один час в трубопроводе длиной 69,3 м пройдет общая масса взвешенных частиц:

$$G_{\text{взв}} = 0,192 \times 69,3 = 13,3 \text{ кг}, \quad (8)$$

а их количество составит около:

$$n = \frac{G_{\text{взв}}}{g_{\text{взв}}} = \frac{13,3}{8,04 \times 10^{-9}} = 1,65 \times 10^9 \text{ ед/ч}. \quad (9)$$

Суммарная площадь поверхности такой массы взвешенных частиц:

$$S_{\text{взв}} = 3,14 \times d_3^2 = 3,14 \times (2 \cdot 10^{-3})^2 = 1,26 \times 10^{-5} \text{ см}^2 = 1,26 \times 10^{-9} \text{ м}^2.$$

Из общего количества выпавшего в осадок карбоната кальция на поверхности трубопровода осаждается:

$$G_{\text{CaCO}_3}^n = 451 \times 3,35 \times 10^{-2} = 15,1 \text{ г}. \quad (10)$$

Тогда интенсивность отложения карбоната кальция составит:

$$\text{ИО} = \frac{G_{\text{CaCO}_3}^n}{S_{\text{ТР}}} = \frac{15,1}{603} = 1,15 \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}, \quad (11)$$

а суммарная толщина слоя карбоната кальция, образующегося в течение года на поверхности трубопровода, будет равна:

$$S = \frac{\text{ИО}}{\rho} = \frac{1,15}{2,7 \cdot 10^4} \times 8760 = 3,74 \text{ мм/год} \quad (12)$$

Таким образом, полученное расчетным путем значение толщины слоя карбоната кальция практически совпадает с фактически замеренной величиной (4 мм/год).

Изложенную методику расчета можно применить для прогнозирования интенсивности отложений карбоната кальция в системах водоснабжения газоочисток металлургических агрегатов в зависимости от физико-химических характеристик оборотных вод, концентрации взвешенных веществ, а также их дисперсного состава.

В проведенной работе ставилась задача найти возможность отслеживать данные зависимости в рабочем процессе. В связи с этим обследованию подверглись все цеха металлургического предприятия для выявления тепловой нагрузки каждого охлаждаемого элемента и степени влияния на искомую величину – толщину отложений, S , мм/год. Особенно интересные, по нашему мнению, результаты были получены, в основном, на ответственных геометрически рассчитываемых элементах.

Данные исследований и расчетов авторов представлены ниже в табл.1 и табл.2.

Всего в оборотном цикле обследованной системы выпадает в осадок порядка 202 кг/ч карбоната кальция; из них основная масса – 201 кг/ч осаждается на шламе и выводится из системы, и лишь около 1 кг/ч осаждается на поверхностях трубопроводов и очистных сооружений.

Выводы

- аналитически определено количество карбоната кальция в системе оборотного водоснабжения, проходящее по трубопроводу и выпадающее в осадок;
- разработана программа и методика последовательности математического моделирования водно-химического режима промышленного предприятия с подтверждением корректности предложенной модели;
- выполнен пример расчета толщины карбонатных отложений на поверхности водоохлаждаемых элементов с учетом качества оборотной воды.

Таблица 1

Определение толщины отложений в торцевых газовых горелках в зависимости от качества исходной воды и водного баланса

Наименование элемента	Часы работы, ч	Карбонатная жесткость цирк воды, мг-экв/дм ³	P ₁ , %	P ₂ , %	P ₃ , %	K _y	Толщина отложений, мм/год
Отопительные торцевые газовые горелки	8 048	2,687	0,255	18,291	18,622	1,014	1,913
Торцевая кислородная фурма	8 048	2,687	0,279	20,033	20,395	1,014	2,095
Взрывные фурмы шлаковиков	8 048	2,687	0,297	21,291	21,676	1,014	2,227
Шибера наклонные в боровах	8 048	2,687	0,279	20,033	20,395	1,014	2,095
Охлаждение рамы шибера	8 048	3,362	0,096	0,286	0,453	1,268	0,047
Охлаждение языка	8 048	3,071	0,158	0,923	1,152	1,159	0,118
Сводные кислородные продувочные фурмы	8 048	2,732	0,23	7,358	7,658	1,031	0,787
НЗТЖС через свод	8 048	3,193	0,131	0,57	0,773	1,205	0,079
Охлаждение подшипников вентиляторов	8 048	3,29	0,111	0,388	0,569	1,241	0,058

Таблица 2

**Определение толщины отложений в холодильниках шлаковых
отверстий в зависимости от качества исходной воды и водного баланса**

Наименование элемента	Часы работы, ч	Карбонатная жесткость цирк воды, мг-экв/дм ³	P1, %	P2, %	P3, %	Ky	Толщина отложений, мм/год
Холодильники шлаковых отверстий (летка)	8 008	2,687	0,343	24,581	25,026	1,014	2,558
Заслонки рабочих окон	8 008	2,687	0,247	17,706	18,027	1,014	1,843
Газокислородн ые горелки торцевые	8 008	3,04	0,165	1,048	1,283	1,147	0,131
Разгрузочные балки вертикальных каналов	8 008	3,053	0,162	0,996	1,228	1,152	0,126
Заливочные желоба	8 008	3,052	0,162	0,998	1,231	1,152	0,126

Список литературы

1. *Lawrence D.P.* Environmental impact assessment: Practical Solutions to Reccurent Problems // Hoboken: JohnWiles @ Son. – 2003. – 578 p.
2. *Markert B.A., Breure A.M., Zechmeister H.G.* (eds). Bioindicators and biomonitors. Principles, concepts and application // Handbook. Elsevier.Science Ltd. – 2003. – 1017 p.
3. *Вахлер В.Л.* Водоснабжение и водоотведение на металлургических предприятиях. – М., 1977. – 263 с.
4. *Крушель Г.Е.* Образование и предотвращение отложений в системе водяного охлаждения. – М.:Госэнергоиздат, 1965. – 189 с.
5. *Андоньев С.М.* Особенности промышленного водоснабжения. – К.: Будівельник, 1981. – 246 с.

Надійшло до редакції 29.03.2016