

## ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 628.349.08

С. П. Высоцкий, д-р техн. наук, Е. Л. Головатенко

ГОУВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

### ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ ФАКТОРОВ ВОДЫ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОФИКАЦИИ НА ОСАЖДЕНИЕ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ

*Одним из объективных показателей качества используемых природных и подготовленных вод при эксплуатации теплоэнергетического оборудования является химический состав отложений, появление которых – неизбежный и прогрессирующий во времени процесс. Известные методы и схемы водоподготовки не позволяют полностью решать проблемы коррозии и отложений на теплопередающих поверхностях, не всегда представляют собой экологически безопасный процесс из-за сбросов в сточные воды загрязняющих веществ, образующихся в процессе очистки воды.*

*Ключевые слова:* поверхность нагрева, карбонат кальция, температура подогрева воды, накипеобразование, кальцит, арагонит, ватерит

#### **Формулировка проблемы**

Воздействие систем теплоснабжения на окружающую среду связано с тем, что в теплоэнергетическом оборудовании в результате физико-химических процессов, протекающих в водной среде, на поверхностях нагрева образуются твердые отложения, ухудшающие процессы теплопередачи. Коррозионный слой и отложения увеличивают потребление топлива, снижают надежность, эффективность и работоспособность теплообменного оборудования и трубопроводов. Образование отложений может полностью блокировать работу системы, вызвать закупоривание, ускорить коррозию и привести к местным перегревам, прогарам и разрывам трубных систем в котлах, результатом которых является увеличение выбросов вредных веществ в атмосферу и сбросы в водоемы.

Следующий показатель работы предприятий теплоснабжения связан с загрязнением поверхностных водных источников засоленными стоками. На большей части котельных установок систем теплоснабжения применяется умягчение подпиточной воды в натрий-катионитных фильтрах. Это процесс фильтрования через слой катионита в натриевой форме. При этом ионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , обуславливающие жесткость исходной воды, задерживаются катионитом в обмен на эквивалентное количество ионов  $\text{Na}^+$ . Остаточная жесткость фильтра при Na-катионировании может быть получена при надлежащих условиях регенерации фильтра на уровне 5–10 мг-экв/дм<sup>3</sup>, что является определяющим при реализации этого процесса. Ионный обмен характеризуется эквивалентностью, поэтому из воды удаляются ионы с меньшей эквивалентной массой ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), а их место занимает ион натрия с большей эквивалентной массой. Процесс умягчения при Na-катионировании заканчивается при наступлении проскока жесткости, после чего истощенный катионит в фильтре надо регенерировать, т. е. восстанавливать его способность к обмену ионами.

На водоподготовительных установках расход раствора NaCl на регенерацию фильтров составляет 140–170 г/г-экв поглощенных катионов жесткости. Таким образом, при умягчении исходной воды из канала Северский Донец-Донбасс жесткостью 7 мг-экв/дм<sup>3</sup> на каждый м<sup>3</sup> умягчаемой воды расходуется 0,91–1,19 кг соли (в пересчете на твердое вещество). Рассолы в виде стоков, состоящие из хлоридов натрия, кальция и магния, сбрасываются в поверхностные водоемы, превращая их в сточные канавы.

### Цель

Исследование закономерностей образования элементного и фазового состава отложений на внутренних поверхностях нагрева теплоэнергетического оборудования. При выполнении работы был изучен элементный состав, структура и форма отложений, образованных на внутренних поверхностях нагрева водоподогревателей, трубопроводов, водогрейных и паровых котлов при разных водно-химических режимах (на примере котла ПТВМ-100); дана оценка влияния качества природной и подготовленной воды на состав формирующихся отложений.

### Основной материал

Изучение формирования отложений, образующихся под влиянием различных физико-химических факторов в водопроводах и на поверхностях теплообмена теплоэнергетического оборудования, позволит улучшать технологические решения и оценивать качество природных и подготовленных вод, гидрогеологическую и эколого-геохимическую обстановку окружающей среды, изменяющуюся под воздействием интенсивной эксплуатации поверхностных и подземных вод в условиях всевозрастающей техногенной нагрузки. Учитывая, что интенсивность образования отложений увеличивается с уменьшением скорости движения воды, т. е. с повышением времени ее пребывания в зоне нагрева, становится очевидным возможность снижения интенсивности отложений за счет изменения конфигурации поверхностей нагрева. Необходимость такого решения возникает, например, при ухудшении качества исходной воды или при необходимости повышения температуры подогрева воды.

Для оценки влияния различных факторов на образование отложений на поверхностях нагрева выполнен анализ состава отложений из охлаждаемых поверхностей печи завода ферросплавов (таблица 1).

Таблица 1 – Состав отложений на печи завода ферросплавов

| SiO <sub>2</sub> | CaO  | MgO | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | P    | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Pb  | Zn  | ППП  | C   |
|------------------|------|-----|--------------------------------|-----|--------------------------------|------|-----------------|------------------|-----|-----|------|-----|
| 7,3              | 37,1 | 9,6 | 1,7                            | 1,4 | 0,8                            | 0,21 | 1,2             | 0,2              | 0,2 | 0,5 | 39,9 | 9,7 |

Как известно, большинство гидрокарбонатов различных металлов растворимы в воде. Гидрокарбонат кальция обуславливает карбонатную или временную жесткость воды. При нагревании раствора Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> он разлагается:



Таким образом, реакция разложения гидрокарбоната кальция является обратной процессу его образования:



Именно эти реакции являются основными, по которым формируется накипь в водонагревательных системах, так как в исходной воде почти всегда содержится гидрокарбонат кальция, более растворимый, чем его карбонат.

Из уравнений (3) и (4) видно, какое количество CO<sub>2</sub> выделяется при прокаливании осадка и сопоставление данных потерь и количества CO<sub>2</sub>, образующегося по результатам анализа осадка на CaO и MgO:



$\text{CO}_2$  от  $\text{CaCO}_3 = 29,15$ ;  $\text{CO}_2$  от  $\text{MgCO}_3 = 10,56$ , поэтому разница от всего состава воды составляет 0,48 %.

Одним из решений снижения накипеобразования при высоком карбонатном индексе исходной воды, что имеет место при использовании очищенных шахтных вод для подпитки тепловых сетей с закрытым водоразбором, является применение подогрева воды в сетевых подогревателях, для которых длительность нахождения воды в зоне нагрева не превышает 5 с (при подогреве воды до 130–150 °С). В этом случае количество отложений составляет 2 кг/м<sup>2</sup>, которое образуется только после примерно шестилетнего периода эксплуатации при карбонатной жесткости 1,4–1,5 мг-экв/дм<sup>3</sup>. В этом случае для обработки воды можно ограничиться ее умягчением в осветлителях или подкислении и декарбонизации.

Во многих городах в котельных установлены котлы ПТВМ-100. Учитывая то, что интенсивность образования отложений зависит от качества воды, так называемого карбонатного индекса, температуры нагрева воды и времени пребывания воды в поверхностях нагрева, целесообразно оценить технологические показатели указанных котлов. В таблице 2 приведены основные показатели работы котла при его производительности 2100 т/ч.

Таблица 2 – Характеристика поверхностей нагрева котла ПТВМ-100

| № п/п | Поверхность нагрева   | Длина трубы, м | Скорость потока, м/с | Время пребывания в зоне нагрева, с |
|-------|-----------------------|----------------|----------------------|------------------------------------|
| 1     | Фронтной задний экран | 10,0           | 1,42                 | 7,0                                |
| 2     | Нижний конвективный   | 12,5           | 1,42                 | 8,8                                |
| 3     | Верхний конвективный  | 12,5           | 1,10                 | 11,4                               |
| 4     | Боковой экран         | 10,0           | 1,48                 | 6,8                                |
| Итого |                       |                |                      | 34                                 |

При подсоединении поверхности нагрева по четырехходовой схеме и расходе воды 1235 т/ч время пребывания воды в зоне нагрева составит 59 с. Нагревательные котельные агрегаты работают в сложных технологических условиях. При этом скорость потока воды в оборудовании составляет 0,8÷1 м/с. Значительное повышение температуры стенок труб приводит к образованию на внутренней поверхности котла слоя накипи толщиной всего 1–2 мм. Допустимая величина интенсивности образования отложений 0,11 (г/м<sup>2</sup>·ч) [1]. Загрязнение теплообменных поверхностей накипными отложениями снижает эффективность работы оборудования, требует периодической остановки для проведения дорогостоящих мероприятий по его очистке, а также дополнительного обслуживания либо преждевременной замены отдельных элементов, вызывает цепочку экономических затрат при транспортировке и потреблении тепла.

В зависимости от температуры нагрева жидкости, ее жесткости и щелочности скорость накипеобразования определяется по формуле [1, 2]:

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

где  $t$  – температура воды, °С;

$Ж$  – карбонатная жесткость воды, г-экв/дм<sup>3</sup>;

$Щ$  – общая щелочность воды, г-экв/дм<sup>3</sup>.

При расчете принимаем температуру за отопительный сезон 80 °С и 100 °С.

Произведение карбонатной жесткости воды на общую щелочность равняется карбонатному индексу ( $I_K$ ). В теплоснабжении этот нормативный показатель при различных технологиях водоподготовки в обработанной воде в соответствии с нормами и правилами технической эксплуатации должен быть выдержан соответственно температуре подогрева воды. При отводе тепла от теплообменников очень важно, чтобы коэффициент загрязнения воды находился на наиболее низком уровне [3, 4]. Из таблицы 3 видно, что при увеличении тол-

щины отложений резко возрастает потребление энергии, что увеличивает текущие эксплуатационные затраты.

Таблица 3 – Изменение энергозатрат и коэффициента теплопередачи в зависимости от толщины отложений

| Толщина отложений, мм | Коэффициент теплопередачи, Вт/м <sup>2</sup> ·°К | Увеличение энергозатрат, % |
|-----------------------|--|----------------------------|
| 0,15                  | 4184   | 5,3                        |
| 0,3                   | 1730   | 10,6                       |
| 0,6                   | 862  | 21,5                       |
| 0,9                   | 578  | 32,2                       |
| 1,2                   | 433  | 43,0                       |

При накипеобразовании карбонат кальция кристаллизуется в трех основных полиморфах: ватерит, арагонит и кальцит (рисунок 1).

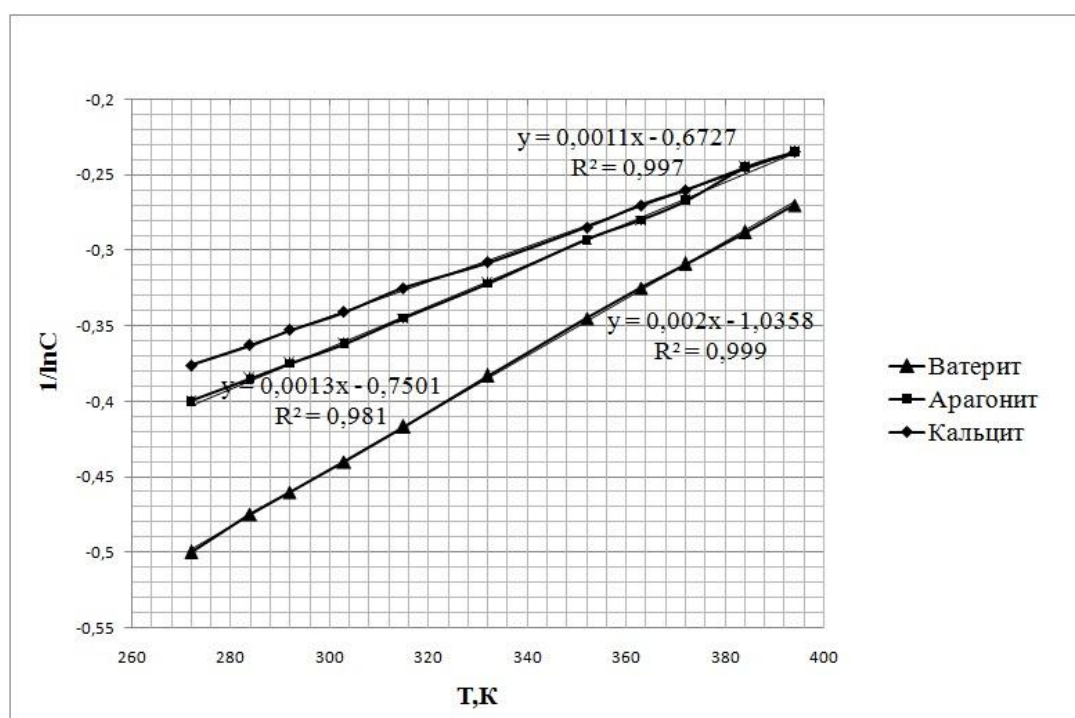


Рисунок 1 – Переход полиморфных модификаций карбоната кальция при высокой температуре

Три формы этой соли имеют обратную растворимость, а именно их растворимость в воде уменьшается при увеличении температуры. Была получена зависимость перехода полиморфных модификаций карбоната кальция от температуры.

Ватерит имеет поликристаллическую, гексагональную структуру. В нем есть продукт с высокой растворимостью, и он легко превращается в стабильные полиморфы. Арагонит имеет ромбическую структуру и часто образует иглы. Кальцит, наиболее устойчивый полиморф, образует ромбоэдрические структуры в форме кубов. И кинетика и термодинамика способствует определению конечного состава карбоната кальция ( $CaCO_3$ ). На рисунке 2 отражено, что когда полиморфы выпадают в осадок из аморфного карбоната кальция, кальцит, доминирует при более низких температурах и арагонит при более высоких. Ватерит обычно встречается при более высоких перенасыщениях.

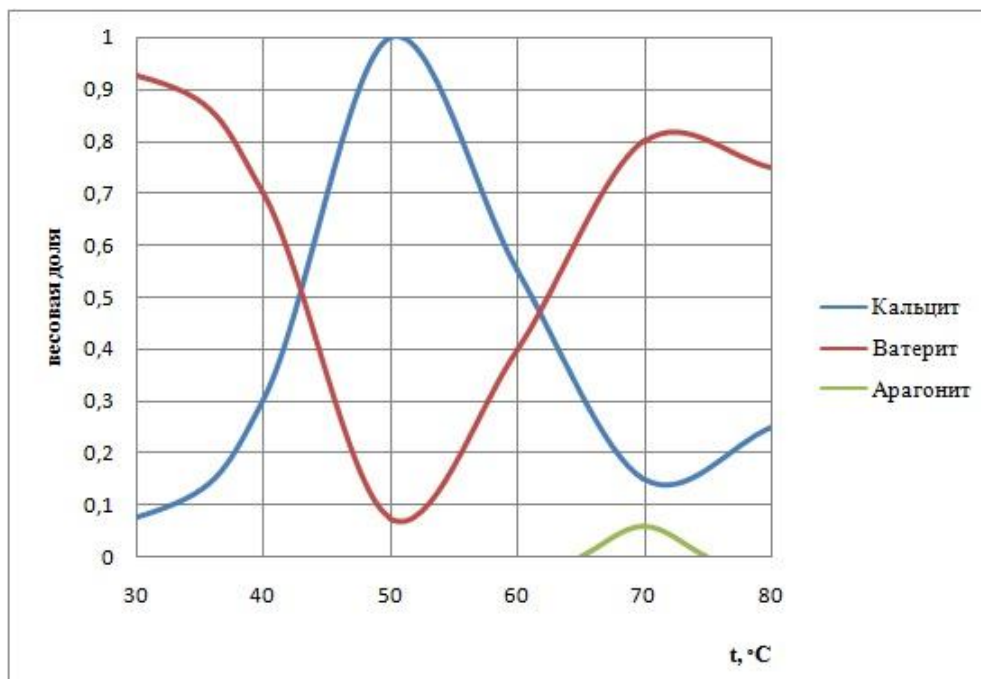
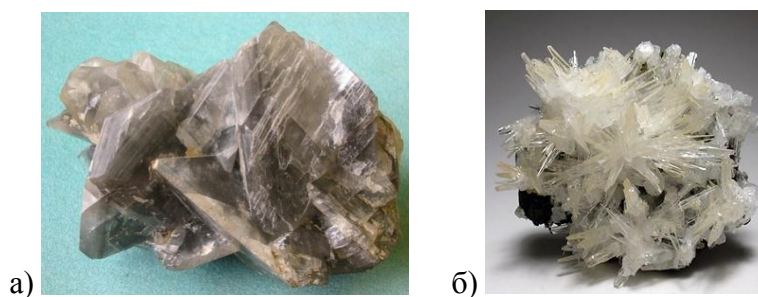


Рисунок 2 – Массовая доля фракций карбоната кальция в зависимости от температуры

В определенных условиях кальцит образуется и существует при температурах от 0° до 100°. В кальцит переходят все другие модификации. Скорость этого превращения зависит от температуры и других условий. Кальцит более растворим, чем арагонит. Без присутствия особых добавок арагонит образуется только в определенных условиях и обычно вместе с кальцитом при температуре 30°–100° [5, 6]. При искусственном получении арагонита содержание его повышается при высоких температурах. При температуре 100° удастся искусственно получить арагонит с минимальным содержанием кальцита. Арагонит кристаллизуется обычно в виде игл [7]. Часто кристаллы образуют двойники и агрегатные (соматоидные) формы в виде ветвей, колосьев и снопов. В сухом состоянии арагонит устойчив. При нагревании арагонита при температуре около 450° он переходит в кальцит. С помощью дифференциального термографического метода доказано, что этот переход совершается с затратой известного количества тепловой энергии, составляющего по Цветкову в среднем 1,82 кал. на 1 г карбоната кальция. Менее устойчивой формой карбоната кальция, чем арагонит, является ватерит. Легче всего он образуется в щелочной среде. В нейтральной и слабокислой среде ватерит переходит в кальцит. С повышением температуры превращение ускоряется. В сухом состоянии ватерит может сохраняться годами. При нагревании примерно при 445° он переходит в кальцит, с освобождением тепла. Кристаллы ватерита имеют обычно форму сферолитов. О выходах ватерита при получении его при температурах выше 0° в литературе нет данных. При нагревании раствора чистого гидрокарбоната кальция до 60°–65° образуются кристаллы ми-карбоната кальция. При более низкой температуре из некристаллического карбоната кальция обычно образуются кристаллы гексагидрата в виде шестиугольных пластинок. При температуре выше +15° (по другим источникам +17,5°) гексагидрат неустойчив. Объемный вес зависит от формы кристаллов, их величины и степени агрегации. Наименьшим объемным весом обладают кристаллы и их агрегаты, имеющие форму игл. Такая форма кристаллов присуща обычно арагониту. Из рисунка 3 видно, что кристаллы кальцита более правильной формы, в то время как кристаллы арагонита имеют дендритную структуру и игольчатую форму. Нередко арагонит образует кристаллические псевдогексагональные сростки, радиально-лучистые, шестоватые и звездчатые агрегаты.



а) кальцит; б) арагонит

Рисунок 3 – Кристаллы карбоната кальция при 1000-кратном увеличении

Кристаллы карбоната кальция в форме арагонита обладают более низкими значениями свободной поверхностной энергии по сравнению с кристаллами кальцита, что обуславливает низкую адгезию к материалу теплообменной поверхности, а также низкую когезию кристаллов арагонита между собой. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что получение карбоната кальция в модификации арагонита дает возможность исключить его отложение на поверхностях оборудования и сделать управляемым процесс водоподготовки [8].

Наличие некоторых ионов, присутствующих в растворе, в значительной мере влияет на скорость кристаллизации. Она зависит от энергии гидратации и ионного радиуса (таблица 4).

Таблица 4 – Механизм перехода от кальцита к арагониту в зависимости от ионного радиуса и энергии гидратации [9, 10]

| Катионы          | Ионный радиус, $\text{Å}^\circ$ | Энергия гидратации, $e_y$ | Переход от кальцита к арагониту под воздействием данного иона |
|------------------|---------------------------------|---------------------------|---|
| $\text{Mg}^{2+}$ | 0,78                            | 21,2                      | Присутствует  |
| $\text{Ni}^{2+}$ | 0,78                            | 22,4                      |   |
| $\text{Co}^{2+}$ | 0,82                            | 22,6                      |   |
| $\text{Fe}^{2+}$ | 0,83                            | 21,7                      |   |
| $\text{Zn}^{2+}$ | 0,83                            | 22,9                      |   |
| $\text{Cu}^{2+}$ |                                 | 22,3                      |   |
| $\text{Mn}^{2+}$ | 0,91                            |                           | Отсутствует   |
| $\text{Cd}^{2+}$ | 1,03                            | 20,1                      |   |
| $\text{Ca}^{2+}$ | 1,06                            | 17,7                      |   |
| $\text{Sr}^{2+}$ | 1,37                            | 16,6                      |   |
| $\text{Pb}^{2+}$ | 1,32                            |                           |   |
| $\text{Ba}^{2+}$ | 1,43                            | 15,0                      |   |

Катионы, которые имеют радиус меньше, а энергию гидратации больше, чем  $\text{Ca}^{2+}$  (кроме  $\text{Mn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$ ), ориентируют возникновение кристаллов арагонита в осадках и нормально кристаллизуются в виде кальцита. Этот факт не наблюдается при радиусе катионов большем, чем радиус кальцита.

### Выводы

1. Отложения карбонатов кальция и магния на теплопередающих поверхностях существенно снижают экономичность работы оборудования и могут интенсифицировать коррозионные процессы вследствие образования пар дифференциальной аэрации.
2. Снижение интенсивности накипобразования при высоком карбонатном индексе исходной воды может быть достигнуто путем уменьшения времени пребывания воды в зоне нагрева, например, за счет использования подогревателей и двухконтурного нагрева, а также за счет влияния на форму образующихся кристаллов.

3. При существующих технологиях умягчения воды в натрий-катионитных фильтрах происходит значительный сброс засоленных стоков в поверхностные водоемы. При умягчении воды из канала Северский Донец-Донбасс в поверхностные водоемы сбрасывается более 1,19 кг хлоридов натрия, кальция и магния на каждый м<sup>3</sup> очищенной воды.

4. При подогреве воды возможно образование трех полиморфных соединений карбоната кальция: кальцита, арагонита и ватерита. Предпочтительной формой кристаллов является арагонит, так как он обладает меньшей адгезией к теплопередающей поверхности. Присутствие в водном растворе ионов железа инициирует кристаллизацию карбоната кальция в виде арагонита.

5. Определены аналитические зависимости произведения растворимости различных форм карбоната кальция в водных растворах.

### **Список литературы**

1. Высоцкий, С. П. Обработка подпиточной воды для систем теплофикации и условия накипеобразования / С. П. Высоцкий, С. Е. Гулько // Очистка, кондиционирование и использование вод повышенной минерализации : монография. – Донецк : Каштан, 2014. – 316 с.
2. Высоцкий, С. П. Условия кристаллизации из растворов / С. П. Высоцкий, С. Канда // Экологические и ресурсосбережение. – 1995. – июль.
3. Карбонаты. Минералогия и химия : перевод с английского / под редакцией Р. Дж. Ридера. – Москва : Мир, 1987. – 329 с.
4. Дриккер, Б. Н. Ресурсосберегающие технологии в водоподготовке промышленных предприятий и теплоэнергетики / Б. Н. Дриккер, А. С. Михалев, В. К. Пинигин // Энергосбережение и водоподготовка. – 2000. – № 3. – С. 45–47.
5. Штруммер, Р. Физико-химические основы образования и предотвращения накипи / Р. Штруммер. – Москва : Госэнергоиздат, 1933. – С. 48.
6. Тодес, О. М. Массовая кристаллизация из растворов / О. М. Тодес, В. А. Себалло, А. Д. Гольдцикер. – Ленинград : Химия, 1984. – 232 с.
7. Hall, R. E. Scale formation // Carnegie Inst. of Technol., Bureau of Mines, Bull., 1924. – P. 24.
8. Hasson, D., Prediction of Calcium Carbonate Scaling Rates / D. Hasson, H. Sherman, M. Biton // Proceeding 6th Intern. Symp. Fresh Water from the Sea. – 1978. – V. 2. – P. 193–199.
9. Ogino T. The Formation and Transformation Mechanism of Calcium Carbonate in Water / T. Ogino, T. Suzuki, K. Sawada // Geochimica et Cosmochimica. – 1987. – Acta 51. – P. 2757–2767.
10. Prah J. Precipitation of Calcium Carbonate From a Calcium Acetate and Ammonium Carbamate Batch System / J. Prah, J. Maček, G. Dražič // Journal of Crystal Growth. – 2011. – 324. – P. 229–234.

**С. П. Высоцкий, Е. Л. Головатенко**

**ГОУВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка**

**Изучение влияния режимных факторов воды в системах теплофикации  
на осаждение карбоната кальция**

Системы теплоснабжения наряду с обеспечением комфортных условий жизнедеятельности оказывают значительное неблагоприятное воздействие на среду обитания. Это обусловлено расходом энергоресурсов и соответствующим выбросом загрязняющих веществ в атмосферу, а также сбросом засоленных стоков после водоподготовительного оборудования, установленного в котельных. Качество подпиточной и сетевой воды в системах теплоснабжения оказывает большое влияние на образование отложений на теплопередающих поверхностях и коррозию оборудования.

Выполнен анализ процессов отложения разных форм карбоната кальция. Показано, что на процесс накипеобразования существенно влияет время пребывания воды в зоне нагрева. Уменьшение длительности пребывания воды в зоне нагрева, например за счет применения сетевых подогревателей, позволяет существенно сохранить интенсивность накипеобразования или использовать подпиточную воду с более высоким карбонатным индексом – производением концентраций ионов кальция на щелочность воды.

Приведены данные о времени пребывания воды в зоне нагрева при различном подключении поверхностей нагрева для широко распространенных в практике стран СНГ водогрейных котлов ПТВМ-100. Изменение которого также позволяет регулировать интенсивность накипеобразования при различном качестве подпиточной воды.

Выполнена оценка изменения коэффициента теплопередачи и энергозатрат при увеличении толщины накипи на поверхности трубопроводов. Показано, что при подогреве воды возможно образование трех поли-

морфных соединений карбоната кальция: кальцита, арагонита и ватерита. Предпочтительной формой является арагонит, так как он обладает меньшей адгезией к поверхностям нагрева. Присутствие в растворе некоторых ионов инициирует кристаллизацию карбоната кальция в виде арагонита. Это обеспечивает возможность влияния на процесс накипеобразования.

Существующие технологии подготовки воды путем умягчения в натрий-катионитных фильтрах создают проблему значительного сброса засоленных стоков в поверхностные водоемы. При умягчении воды из канала Северский Донец-Донбасс в поверхностные водоемы сбрасываются более 1,19 кг хлоридов натрия, кальция и магния на каждый м<sup>3</sup> очищенной воды. Приведены выведенные аналитические выражения произведений растворимости различных форм карбоната кальция в водных растворах в зависимости от температуры подогрева воды.

ПОВЕРХНОСТЬ НАГРЕВА, КАРБОНАТ КАЛЬЦИЯ, ТЕМПЕРАТУРА ПОДОГРЕВА ВОДЫ, НАКИПЕОБРАЗОВАНИЕ, КАЛЬЦИТ, АРАГОНИТ, ВАТЕРИТ

*S. P. Vysotskiy, E. L. Golovatenko*  
*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka*  
**Study of Water Operation Factors Impact on the Precipitation of Calcium Carbonate in Heat Supply Systems**

Heat supply systems along with providing comfortable living conditions have a significant adverse effect on the habitat. This is due to energy consumption and corresponding emission of pollutants into the atmosphere, as well as the discharge of saline effluents after water treatment equipment installed in boiler rooms. The quality of make-up and delivery water in heat supply systems has a great influence on the formation of deposits on heat exchange surfaces and equipment corrosion.

The analyses of the precipitation process of various forms of calcium carbonate is carried out. It is shown that the scale formation process is significantly affected by the residence time of water in the heating area. Reducing the duration of water residence time in the heating area, for example through the use of network heaters allows to save significantly the intensity of scale formation or to use makeup water with a higher carbonate index – the product of the concentration of calcium ions on the water alkalinity.

Data on the residence time of water in the heating area at various connection of heating surfaces for PTVM-100 hot water boilers widely used in the CIS countries are given. Changing it also allows to adjust the intensity of scale formation with different quality of make-up water.

An assessment of changes in the heat transfer coefficient and energy consumption with an increase in the scale thickness on the surface of pipelines is carried out. It is shown that when water is heated, the formation of three polymorphic compounds of calcium carbonate is possible: calcite, aragonite and vaterite. A preferred form is aragonite, since it has less adhesion to heating surfaces. The presence of some ions in the solution initiates the crystallization of calcium carbonate in the form of aragonite. This provides the opportunity to influence the scale formation process.

Existing technologies for water treatment by softening in sodium-cation exchange filters create the problem of significant discharge of saline effluents into surface water bodies. When softening water from the channel Severky Donets-Donbass more than 1,19 kg of sodium, calcium and magnesium chlorides for every m<sup>3</sup> of purified water are discharged into surface water bodies. Derived analytical expressions of solubility products of various forms of calcium carbonate in water solutions depending on the temperature of water heating are given.

HEATING SURFACE, CALCIUM CARBONATE, WATER HEATING TEMPERATURE, SCALE FORMATION, CALCITE, ARAGONITE, VATERITE

**Сведения об авторах:**

**С. П. Высоцкий**

SPIN-код: 7497-0100  
 Scopus Author ID: 7004891012  
 ORCID ID: 0000-0002-2988-7245  
 Телефон: +38 (071) 391-35-97  
 Эл. почта: sp.vysotsky@gmail.com

**Е. Л. Головатенко**

Телефон: +38 (071) 391-35-97

*Статья поступила 11.10.2019*

© С. П. Высоцкий, Е. Л. Головатенко, 2019

*Рецензент: А. П. Карпинец, канд. хим. наук, доц., АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»*