

# НОВЫЙ СПОСОБ ЗАЩИТЫ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ОТ НАКИПЕОБРАЗОВАНИЯ

**Ф.Ф. Чаусов, И.С. Казанцева**

**Удмуртский государственный университет, г. Ижевск,  
Физико-технический институт УрО РАН, г. Ижевск**



**О**бразование кристаллического осадка минеральных солей (накипи) на поверхностях тепло-технического оборудования является одной из основных причин снижения КПД производственных и отопительных котельных, пережога топлива и сверхнормативного выброса в атмосферу так называемых "парниковых газов". Причиной образования накипи является присутствие в составе природных вод, используемых в качестве теплоносителей, солей жесткости — малорастворимых солей щелочно-земельных металлов, выпадающих в осадок при нагревании воды.

Разумеется, идеальным для эксплуатации тепло-технического оборудования был бы такой способ обработки воды, при котором гарантированно исключалось бы образование накипных отложений. Создание такой технологии водоподготовки позволило бы полностью исключить (по крайней мере, для наиболее распространенного типа водогрейных отопительных котельных установок) использование традиционной ионообменной технологии водоподготовки, основной недостаток которой — неизбежные сбросы хлоридов в окружающую среду. Каждая котельная, в которой для противонакипной обработки воды используется ионообменная водоподготовка, в течение отопительного сезона сбрасывает в окружающую среду отработанные рассолы, содержащие от нескольких тонн до нескольких сотен тонн хлоридов натрия и кальция. Так как многие котельные расположены в сельской местности, сброс сточных вод производится в местные водоемы, на рельеф или в простейшие выгребные ямы. Загрязнение окружающей среды хлоридами, которые не подвержены природному метаболизму, приводит к разрушению при-

родных биогеоценозов и снижению биоразнообразия в окрестностях населенных пунктов, отапливаемых такими котельными. При этом ионообменная технология водоподготовки требует тщательного соблюдения технологических режимов (что трудно обеспечить в сельской местности), однако даже это не исключает образования накипи в котлах и теплосетях. Кроме того, коррозионная активность воды после обработки ее в ионообменных фильтрах, как правило, возрастает.

В качестве альтернативы ионообменному способу противонакипной обработки воды достаточно давно рассматривается способ введения в воду органофосфоновых кислот или их производных. Органофосфоновые кислоты являются представителями органических полидентатных комплексообразователей, называемых иначе комплексономми. В известных условиях они образуют прочные комплексные соединения с ионами металлов, входящих в состав накипных и коррозионных отложений — кальция, магния, железа. В результате удается разрушить застарелые отложения и снизить интенсивность образования новых.

Приоритет в применении препаратов на основе органофосфоновых кислот принадлежит специалистам США (Пат. 3431217 США и Пат. 3483133 США). В нашей стране значительные практические результаты были получены в МЭИ под руководством Т.Х. Маргуловой и др. и в ИРЕА под руководством Н.М. Дятловой и др. В настоящее время препараты на основе органофосфоновых кислот являются одними из самых эффективных средств для очистки тепло-технического оборудования. Проблема применения органофосфоновых кислот для борьбы с накипобразованием в тепло-техническом

оборудовании актуальна и неоднократно рассматривалась в научной печати [1, 2]. Достаточно эффективные препараты для противонакипной обработки воды, предложены, например, Б.Н. Дрикером и др. (Пат. 2065410 РФ), С.А. Потаповым [3].

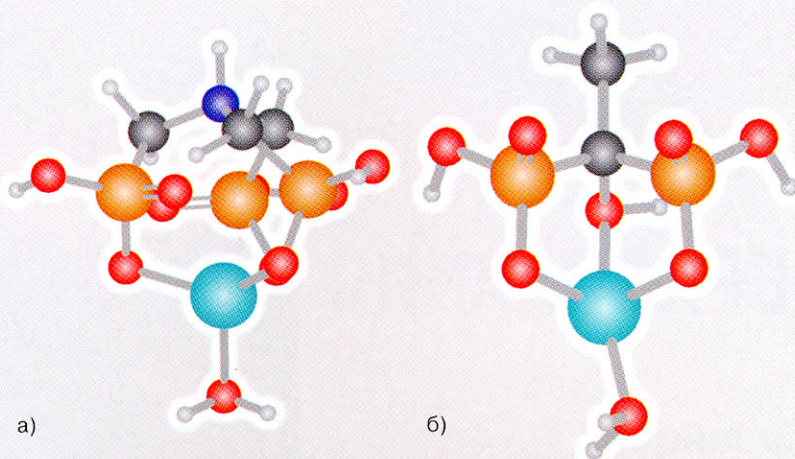
Однако до последнего времени не было известно критерия, позволяющего определить границы эффективного применения фосфонатной водоподготовки. Это было связано с отсутствием сколько-нибудь обоснованных представлений о механизме ингибирующего действия органофосфонатов на кристаллизацию минеральных солей. Поэтому практическое применение фосфонатных препаратов было возможно только после отдельного кропотливого лабораторного тестирования их эффективности по отношению к воде каждого конкретного источника. Однако такая проверка под силу только серьезным специализированным научным центрам.

## *Научные основы*

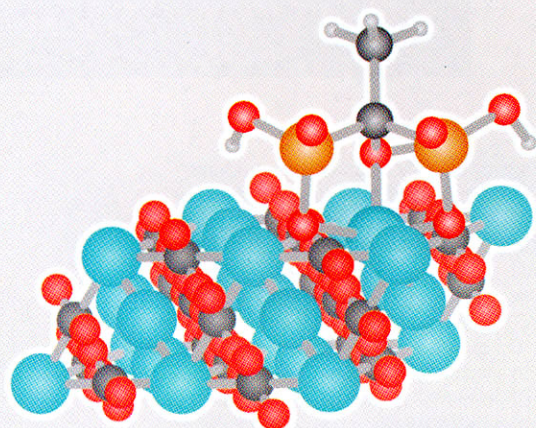
Основы современных представлений о механизме ингибирования солеотложений органофосфонатами разработаны в трудах Томсона и др. [4], Петровой [5], а также автора настоящей статьи [6, 7].

Действующим началом любого фосфонатного ингибитора являются комплексы органофосфоновых кислот с ионами металлов — фосфонаты [8]. При введении в воду исходных органофосфоновых кислот комплексы образуются в результате взаимодействия кислот с ионами металлов, содержащихся в воде или накипно-коррозионных отложениях (кальций, магний, железо). Более эффективными ингибиторами являются цинковые комплексы органофосфоновых кислот, способы





**Рис. 1. Структура комплексов фосфоновых кислот с ионами металлов в нейтральной или слабощелочной водной среде:**  
 а — комплекс НТФ; б — комплекс ОЭДФ



**Рис. 2. Кальциевый комплекс ОЭДФ на грани растущего зародыша кристалла кальцита**

получения которых разработаны А.П. Ковальчуком и др. (Пат. 2115631 РФ, Пат. 2205157 РФ). Эти препараты не только защищают теплотехническое оборудование от накипеобразования, но и значительно снижают скорость коррозии.

Структура комплексов кальция, магния и цинка с нитрилотриметилфосфоновой (НТФ) или оксиэтилидендифосфоновой (ОЭДФ) кислотами достаточно хорошо изучена как путем квантовохимического моделирования, так и традиционными экспериментальными методами. Ионы металлов четырехкоординированы. В комплексах с НТФ (рис. 1, а) три места в коор-

динационной сфере занимают фосфонатные группы (каждая из которых несет заряд, равный заряду электрона), а четвертое — молекула воды. Атом азота протонирован, в результате чего комплекс представляет собой электрический диполь. В комплексах с ОЭДФ (рис. 1, б) отрицательно заряженные фосфонатные группы занимают два места в координационной сфере, третье место занимает спиртовой гидроксил, четвертое — молекула воды. Такой комплекс также обладает электрическим дипольным моментом.

Благодаря дипольному моменту фосфонаты адсорбируются на поверхности кристаллов минеральных солей. В процессе адсорбции фосфонатный комплекс подвергается дегидратации (отщеплению молекулы воды), а ион металла занимает в поверхностном слое кристалла положение, близкое к кристаллографическому. Для кальциевого комплекса НТФ энергия адсорбции на поверхности кристаллов кальцита и барита составляет несколько электрон-вольт — это весьма высокое значение. В результате адсорбции фосфоната над поверхностью кристалла оказывается прочно локализованной разветвленная молекула органофосфоновой кислоты (рис. 2). Из-за того, что молекула органофосфоновой кислоты неизоструктурна кристаллизующейся минеральной соли, кристаллизация последней в зоне адсорбции оказывается невозможной. Вследствие этого кристалл (зародыш кристалла), на поверхности которого адсорбировано достаточное число частиц фосфоната, не может расти и в случае, если он термодинамически неустойчив по отношению к раствору, то разрушится. Таким образом, при введении фосфонатов кристаллизация минеральных солей оказывается невозможной даже в весьма жесткой воде.

Таким образом, наиболее существенным условием для эффективного предотвращения накипеобразования является возможность адсорбции фос-

фонатов на гранях зародышей кристаллов, термодинамически неустойчивых по отношению к раствору. Для этого, во-первых, зародыш должен иметь хотя бы одну минимально развитую грань, содержащую более одной ячейки кристаллической решетки. Геометрические размеры ( $a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$ ) такого зародыша схематически показаны на рис. 3. Во-вторых, изменение изобарно-изотермического потенциала (свободной энергии Гиббса) при образовании такого зародыша из раствора должно быть положительным. Значения концентраций ионов минеральной соли, образующей отложение, и геометрические размеры ячейки кристаллической решетки этой соли связаны следующим соотношением:

$$\ln(C_+C_-/P_0) < \sigma(2ab \sin \gamma + 2ac \sin \beta + bc \sin \alpha)/kTn, \quad (1)$$

где  $C_+$  — концентрация катиона, моль/дм<sup>3</sup>;  $i$  — число катионов;  $C_-$  — концентрация аниона, моль/дм<sup>3</sup>;  $j$  — число катионов;  $P_0$  — произведение растворимости соли, (моль/дм<sup>3</sup>)<sup>2</sup>;  $\sigma$  — значение свободной энергии поверхности раздела кристалла и воды, Дж/м<sup>2</sup>;  $k$  — постоянная Больцмана,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $T$  — абсолютная температура, К;  $n$  — число формульных единиц соли в ячейке кристаллической решетки.

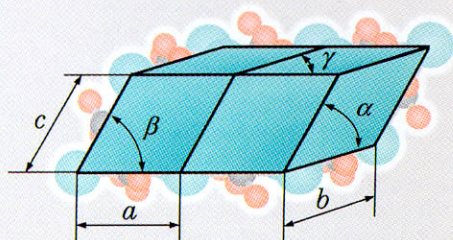
Данное соотношение определяет границу величины  $C_+C_-$ , в пределах которой применение фосфонатов в принципе может предотвратить образование солевых отложений. При большем значении  $C_+C_-$  использование фосфонатов неэффективно.

Простейший анализ показывает, что область эффективного применения фосфонатов достаточно широка при низких температурах и весьма резко сужается при повышении температуры: во-первых, вследствие увеличения знаменателя правой части неравенства (1); во-вторых, за счет уменьшения произведения растворимости и, как следствие, уменьшения знаменателя подлогарифмического выражения.

Следует иметь в виду, что соотношение (1) определяет только теоретический предел. Однако при этом нельзя говорить о том, что во всем интервале концентраций использование фосфонатов для ингибирования накипеобразования целесообразно. Напротив, можно утверждать, что вблизи теоретической границы необходимые для ингибирования солевых отложений концентрации фосфонатов оказываются настолько большими, что способ не оправдывает себя как с экономической, так и с экологической точки зрения. Однако если соотношение (1) не выполнено, то фосфонаты вообще не могут предотвращать накипеобразование.

### Экспериментальная проверка

Для проверки изложенных теоретических выводов были проведены исследования эффективности фосфонатов для ингибирования кристаллиза-



**Рис. 3. Геометрические размеры наименьшего зародыша кристалла**



ции карбоната кальция и сульфата кальция.

Из всех примесей, входящих в состав природных вод, карбонат кальция наиболее активно участвует в процессах накипеобразования. Образующиеся при этом накипи называют карбонатно-кальциевыми. В водном растворе карбонат кальция представлен ионами кальция  $\text{Ca}^{2+}$  и карбонат-анионами  $\text{CO}_3^{2-}$ . Значительная часть карбонат-анионов присутствует в воде в форме гидрокарбонат-анионов и  $\text{HCO}_3^-$ , содержание которых также учитывается при определении накипеобразующей способности воды. Карбонат кальция кристаллизуется в виде кальцита (тригональная сингония, дитригонально-скеленоэдрический вид симметрии) и является наиболее распространенным накипеобразующим минералом. Значительно реже карбонат кальция кристаллизуется в виде арагонита (ромбическая сингония, ромбо-дипирамидальный вид симметрии). Формула карбоната кальция включает один катион ( $i = 1$ ) и один анион ( $j = 1$ ). Произведение растворимости карбоната кальция в виде кальцита при абсолютной температуре  $T = 300$  К составляет  $P_0 = 4,8 \cdot 10^{-9}$  (моль/дм<sup>3</sup>)<sup>2</sup>. Свободная энергия поверхности раздела воды и кальцита составляет  $\sigma = 8 \cdot 10^{-2}$  Дж/м<sup>2</sup>. Длины ребер ячейки кристаллической решетки кальцита в ромбоэдрической (миллеровской) установке составляют  $a = b = c = 6,37 \cdot 10^{-10}$  м, углы между ребрами  $\alpha = \beta = \gamma = 46^\circ 05'$  (соотношения  $a = b = c$  и  $\alpha = \beta = \gamma$  вытекают из наличия оси симметрии 3-го порядка), а число формульных единиц карбоната кальция в одной ячейке кристаллической решетки кальцита  $n = 2$ . Подставляя эти значения в соотношение (1), получим условие эффективного использования фосфонатов для предотвращения кристаллизации карбоната кальция

$$C_{\text{Ca}} C_{\text{CO}_3} < 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ (моль/дм}^3\text{)}^2, \quad (2)$$

где  $C_{\text{Ca}}$  — концентрация ионов  $\text{Ca}^{2+}$ , моль/дм<sup>3</sup>;  $C_{\text{CO}_3}$  — концентрация карбонат-анионов  $\text{CO}_3^{2-}$ , моль/дм<sup>3</sup>.

В проведенных исследованиях необходимой начальной концентрацией ионов кальция создавали, вводя в воду хлорид кальция, а для создания заданной концентрации карбонат-анионов вводили карбонат натрия. Перед смешиванием этих растворов в них добавляли ингибитор накипеобразования — оксиэтилидендифосфоновую кислоту. Полученную смесь выдерживали при температуре  $27 \pm 5^\circ\text{C}$  в течение 4 ч. Эффективность предотвращения накипеобразования определяли по формуле

$$E = \left[ \frac{(C_{\text{Ca,н}} - C_{\text{Ca,к}})}{(C_{\text{Ca}} - C_{\text{Ca,к}})} \right] \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $C_{\text{Ca,н}}$  — установившаяся концентрация ионов кальция, моль/дм<sup>3</sup>;  $C_{\text{Ca,к}}$  — установившаяся концентрация ионов кальция в контрольном опыте (без добавления оксиэтилидендифосфоновой кислоты), моль/дм<sup>3</sup> (рис. 4). Можно видеть, что при выполнении условия

(2) фосфонатная обработка воды достаточно эффективно предотвращает кристаллизацию карбоната кальция. В случаях же, когда  $C_{\text{Ca}} C_{\text{CO}_3} > 6,5 \cdot 10^{-3}$  (моль/дм<sup>3</sup>)<sup>2</sup>, введение ингибитора не позволяет предотвратить выпадение карбоната кальция в осадок.

Сульфат кальция, присутствующий в водном растворе в виде ионов кальция  $\text{Ca}^{2+}$  и сульфат-анионов  $\text{SO}_4^{2-}$ , также выпадает в осадок в виде накипи при нагревании некоторых природных вод. Такое накипеобразование называют сульфатно-кальциевым. Сульфат кальция кристаллизуется в виде гипса (моноклинная сингония, призматический вид симметрии). Формула сульфата кальция включает один катион ( $i = 1$ ) и один анион ( $j = 1$ ). Произведение растворимости сульфата кальция при абсолютной температуре  $T = 300$  К составляет  $P_0 = 2,5 \cdot 10^{-5}$  (моль/дм<sup>3</sup>)<sup>2</sup>. Свободная энергия поверхности раздела воды и гипса составляет  $\sigma = 2,6 \cdot 10^{-2}$  Дж/м<sup>2</sup>. Длины ребер ячейки кристаллической решетки гипса составляют  $a = 5,68 \cdot 10^{-10}$  м,  $b = 15,2 \cdot 10^{-10}$  м,  $c = 6,52 \cdot 10^{-10}$  м. Углы между ребрами ячейки кристаллической решетки  $\alpha = \gamma = 90^\circ$ ,  $\beta = 118^\circ$ . Число формульных единиц сульфата кальция в одной ячейке кристаллической решетки гипса  $n = 4$ . Подставляя эти данные в соотношение (1), получим условие эффективного использования фосфонатов для предотвращения кристаллизации сульфата кальция

$$C_{\text{Ca}} C_{\text{SO}_4} < 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ (моль/дм}^3\text{)}^2, \quad (4)$$

где  $C_{\text{Ca}}$  — концентрация ионов  $\text{Ca}^{2+}$ , моль/дм<sup>3</sup>;  $C_{\text{SO}_4}$  — концентрация карбонат-анионов  $\text{SO}_4^{2-}$ , моль/дм<sup>3</sup>.

При проведении экспериментов по предотвращению кристаллизации сульфата кальция необходимую начальную концентрацию ионов кальция создавали, вводя в воду хлорид кальция, а для создания заданной концентрации сульфат-анионов в воду вводили сульфат натрия. В качестве ингибитора перед смешиванием добавляли нитрилотриметилфосфоновую кислоту. Условия экспериментов были такими же, как и в случае с карбонатом кальция. В отношении сульфата кальция также справедливо, что при выполнении условия (4) фосфонатная обработка воды эффективно предотвращает образование осадка (см. рис. 4). В случаях же, когда условие (4) не выполнено, введение ингибитора не может предотвратить сульфатно-кальциевое накипеобразование.

И сравнительный анализ полученных неравенств (2) и (4), и проведенные эксперименты показывают, что фосфонатная обработка воды против сульфатно-кальциевого накипеобразования становится неэффективной при меньших концентрациях солей, чем обработка против карбонатно-кальциевого накипеобразования (то есть предотвратить сульфатно-кальциевое накипеобразование труднее, чем карбонатно-кальциевое. Этот факт ранее был известен

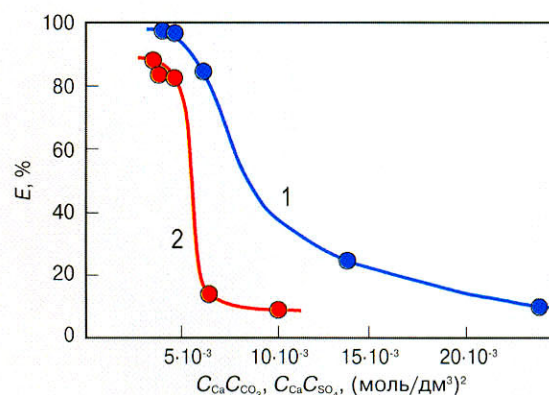


Рис. 4. Зависимость эффективности ингибирования солеотложений карбоната кальция (1) и сульфата кальция (2) от  $C_{\text{Ca}} C_{\text{CO}_3}$  и  $C_{\text{Ca}} C_{\text{SO}_4}$

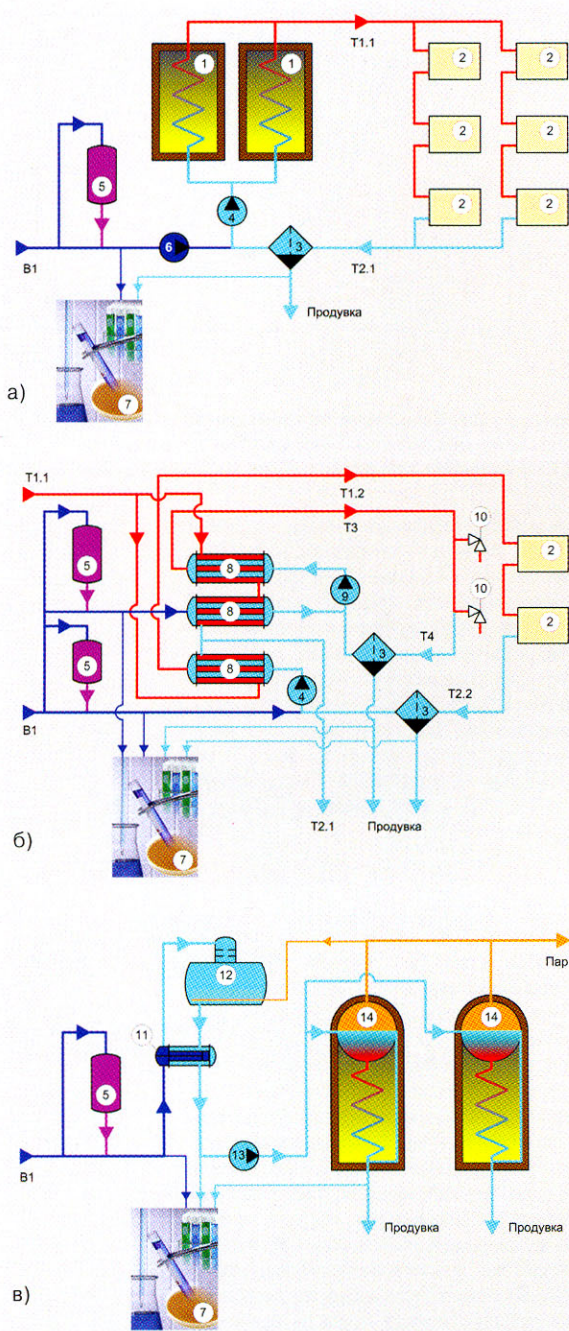
как эмпирическая тенденция, но лишь теперь получил логическое объяснение: все дело — в различных параметрах кристаллических решеток этих солей. Отметим, что структура кристаллической решетки имеет большее значение для эффективности ингибирования солеотложений, чем произведение растворимости. Действительно,  $P_0$  входит в неравенство (1) под логарифмом, в то время как величины  $a$ ,  $b$  и  $c$  совместно с  $\sin \alpha$ ,  $\sin \beta$  и  $\sin \gamma$  образуют полином второй степени.

### Практическое внедрение

С точки зрения практического осуществления предлагаемый способ обработки воды (Пат. 2304084 РФ) органическими фосфонатами имеет ряд отличий от ранее использовавшихся подходов. Во-первых, целесообразность и эффективность применения фосфонатов для предотвращения накипеобразования определяются в зависимости от ионного состава исходной воды, произведенной растворимости солей, параметров их кристаллических решеток и максимальной температуры нагрева воды. Во-вторых, для того чтобы обеспечить отсутствие накипеобразования, необходимо периодически контролировать химический состав воды в процессе функционирования теплотехнической системы, то есть вести химико-аналитический контроль водно-химического режима. В-третьих, в ряде случаев перед введением в воду фосфонатов может потребоваться предварительная очистка воды другими методами для того, чтобы снизить содержание хотя бы одного из ионов соли, образующей отложения, до тех пор пока не будет выполнено соотношение (1).

Главным результатом, достигаемым при использовании описанного способа водоподготовки, является надежное предотвращение образования отложений минеральных солей на поверхностях теплотехнического оборудования. Однако для достижения этого результата необходимо обеспечить дозирование введения в воду теплотехнических систем реагентов (органических фосфонатов, их солей или ком-





**Рис. 5. Схемы различных теплотехнических систем:**

а — одноконтурная закрытая теплосеть и водогрейная отопительная котельная; б — двухконтурная сеть теплоснабжения и горячего водоснабжения; в — паровая котельная; 1 — водогрейный котёл; 2 — приборы потребителей тепловой энергии; 3 — грязевик-шламоотделитель; 4 — циркуляционный насос системы отопления; 5 — дозатор фосфонатов для обработки воды; 6 — подпиточный насос; 7 — химическая лаборатория; 8 — теплообменник (экспресс-бойлер); 9 — циркуляционный насос системы; 10 — водоразборный кран; 11 — теплообменник системы деаэрации; 12 — деаэратор; 13 — насос; 14 — паровой котёл; В1 — водопровод; Т1.1 — прямой трубопровод первого контура теплосети; Т2.1 — обратный трубопровод первого контура теплосети; Т1.2 — прямой трубопровод второго контура теплосети; Т2.2 — обратный трубопровод второго контура теплосети; Т3 — прямой трубопровод системы; Т4 — обратный трубопровод системы

плексов с металлами) в строгом соответствии с нормами технологического режима, а также обеспечить регулярный химико-аналитический контроль обработанной воды.

На рис. 5, а показана схема предлагаемого способа обработки воды применительно к водогрейной отопительной котельной и одноконтурной закрытой теплосети. Воду нагревают в котлах 1 и по прямому трубопроводу тепловой сети Т1.1 подают к приборам потребителей тепловой энергии 2. Остывшая вода по обратному трубопроводу Т2.1 возвращается в котельную, где ее пропускают через грязевик-шламоотделитель 3 и циркуляционным насосом 4 подают в котлы 1. Для восполнения потерь воды вследствие неплотности тепловой сети, а также при продувке грязевика-шламоотделителя 3 используют подпиточную воду из водопровода В1, которую подвергают фосфонатной обработке при помощи дозатора фосфонатов 5 и подпиточным насосом 6 подают на вход циркуляционного насоса 4. Важнейшим условием эффективного применения способа является химический контроль воды на содержание ионов солей образующих отложения (чаще всего кальций, карбонаты, гидрокарбонаты, реже — сульфаты), и на содержание фосфонатов. Для этого необходима химическая лаборатория 7. Химическому контролю необходимо подвергать не только подпиточную воду, но и, главным образом воду тепловой сети, так как под воздействием температуры возможно смещение равновесия  $\text{CO}_3^{2-} \cdot \text{HCO}_3^-$ . При химическом контроле необходимо определять не только содержание указанных веществ, но и прозрачность воды. Это связано с тем, что в большинстве тепловых сетей содержится небольшое количество отложений накипи и продуктов коррозии. Под воздействием фосфонатов эти отложения разрушаются, образуя взвеси. Для удаления взвеси используется грязевик-шламоотделитель 3, который позволяет удалить из воды основную часть взвеси. Отбор воды тепловой сети для контроля прозрачности и химического состава следует производить из дренажной линии грязевика-шламоотделителя после удаления скопившегося в нем отстоя.

Данная технология водоподготовки внедрена авторами статьи более чем на восьмидесяти водогрейных отопительных котельных как в Удмуртской Республике, так и в других регионах России. Опыт внедрения показал, что для водогрейных котельных с температурой воды на выходе из котла не более 150 °С фосфонатная технология обработки воды применима при любом типе котлов. Однако при этом необходимо учитывать, что при нагреве воды в котле в застойных и пристенных зонах происходит местный перегрев воды. Из-за этого температура воды в застойных и пристенных зонах ( $T_{\text{max}}$ ) может

на несколько десятков градусов превышать температуру воды на выходе из котла. Именно это значение температуры воды  $T_{\text{max}}$ , определяемое известными методами расчета теплопередачи, и следует подставлять в соотношения (1). Так как в водогрейных котлах не происходит концентрирования минеральных солей, то при выполнении соотношения (1) водогрейные отопительные котельные могут работать в безнакипном режиме без каких-либо дополнительных систем водоподготовки или очистки теплопередающих поверхностей. Это позволяет полностью отказаться от ионообменной водоподготовки и химической очистки котлов. Таким образом, результатом внедрения нового, прогрессивного способа водоподготовки является резкое снижение техногенной нагрузки на окружающую среду. Судя по накопленному опыту, для квартальных, районных, сельских и крышных котельных описанное техническое решение является оптимальным.

Системы теплоснабжения крупных городов чаще всего строятся по двухконтурной схеме с использованием тепловых пунктов (рис. 5, б), приближенных к потребителям тепловой энергии. Нагретую воду первого контура (например, от ТЭЦ) подают по трубопроводу Т1.1 в теплообменники 8, называемые также экспресс-бойлерами. Традиционно в тепловых пунктах применяют теплообменники кожухотрубчатой конструкции, однако в последнее время чаще используют пластинчатые теплообменники. Поступающую в тепловую точку по водопроводу В1 водопроводную воду используют как для подпитки второго контура тепловой сети, так и для горячего водоснабжения. Воду второго контура тепловой сети нагревают в теплообменнике и по трубопроводу Т1.2 подают к приборам потребителей тепловой энергии 2. Остывшая вода по трубопроводу Т2.2 поступает в грязевик-шламоотделитель 3, откуда ее подают циркуляционным насосом 4 в теплообменник 8 тепловой сети. Потери воды вследствие неплотностей тепловой сети и при продувке грязевика-шламоотделителя 3 восполняют, подпитывая тепловую сеть водопроводной водой, прошедшей обработку фосфонатом при помощи дозатора 5. Для горячего водоснабжения используют водопроводную воду (по качеству она должна быть пригодна для питья), которую также обрабатывают при помощи дозатора 5, вводя в нее дозу фосфоната, не превышающую предельно допустимую концентрацию в питьевой воде. После этого воду подают в теплообменники 8 первой, а затем насосом 9 — второй ступени и по трубопроводу Т3 направляют потребителям горячей воды в водоразборные краны 10. Неизрасходованная потребителями и частично остывшая вода возвращается по трубопроводу Т4 и объединяется с водопроводной водой,



частично подогретой в теплообменнике 8 первой ступени.

Достоинством такой системы водоподготовки является высокая эффективность предотвращения солеотложений, а также компактность и отсутствие токсичных выбросов в окружающую среду. Использование фосфонатной обработки воды позволяет подпитывать второй контур тепловой сети водопроводной водой, избегая потребления для этой цели химически обработанной воды ТЭЦ. Кроме того, вода горячего водоснабжения (ГВС) после обработки фосфонатами (при соблюдении необходимых технологических норм) сохраняет пригодность для питья. Новая технология водоподготовки внедрена авторами статьи более чем в двух десятках тепловых пунктов Удмуртской Республики и других регионов России (полностью или частично, только для системы ГВС). Опыт эксплуатации показал, что в результате применения фосфонатной обработки воды исключается образование отложений в теплообменниках и тепловых сетях, что позволяет исключить их регулярную чистку. Значительно снижается коррозия трубопроводов квартальных тепловых сетей, число порывов и затраты на аварийные и плановые ремонтные работы.

Фосфонатная технология противонакипной обработки воды может с успехом применяться и для паровых котельных (рис. 5, в). Воду из водопровода В1 обрабатывают фосфонатами при помощи дозатора 5, после этого подогревают в теплообменнике 11 и подают в деаэрактор 12. Деаэрированную воду охлаждают в теплообменнике 11 и питательным насосом 13 подают в паровые котлы 14. Химико-аналитическому контролю в химической лаборатории 7 при этом подвергают водопроводную воду, обработанную фосфонатами, воду из деаэратора и воду из продувочных линий паровых котлов. Однако при использовании фосфонатной водоподготовки для паровых котельных необходимо учитывать, что в паровом котле имеют место не только локальные перегревы воды, но и концентрирование минеральных солей. Поэтому при выборе способа противонакипной обработки воды в соотношении (1) следует подставлять концентрации ионов солей, образующих отложения в отсеке котла с наибольшей минерализацией воды. Наряду с высокими значениями температуры воды  $T_{max}$  это предопределяет достаточно жесткие ограничения на допустимую жесткость используемой подпиточной воды. Практика показала, что фосфонатная обработка воды эффективно предотвращает накипобразование в паровых котлах низкого давления (до 14 кгс/см<sup>2</sup>) при жесткости исходной воды в пределах 2,5 мг-экв./л. Этому условию отвечают природные воды водоемов Севера России. При большей жесткости воды во многих случаях требуется предвари-

тельное умягчение воды в катионитовых фильтрах. Однако расход соли на регенерацию фильтров и сброс хлоридов в окружающую среду в этом случае значительно меньше, чем при эксплуатации паровой котельной с традиционной (двухступенчатой) схемой водоподготовки. Это подтверждается опытом внедрения авторами статьи фосфонатной водоподготовки на паровых котельных, преимущественно производственного назначения, в том числе котельных ГУП "Птицефабрика "Варасино", ОАО "УралАТИ", ОАО "Пермский лесозавод".

В качестве дозирующих устройств для обработки воды фосфонатами наиболее положительно зарекомендовали себя дозирующие устройства "Комплексон-7" (Пат. 52972 РФ) и "Иж-25" (Пат. 22714 РФ) (рис. 6). Важным достоинством этих устройств является гидравлическая автоматика, обеспечивающая дозирование реагента пропорционально расходу подпиточной воды. Дозирующее устройство "Комплексон-7" наиболее эффективно для обработки воды водогрейных отопительных котельных и закрытых тепловых сетей. Устройство же "Иж-25" находит применение для обработки воды открытых систем теплоснабжения, систем ГВС и паровых котельных.

*Разработанный авторами способ фосфонатной обработки воды позволяет получить надежный и воспроизводимый результат — отсутствие накипи на поверхностях теплопередачи и отказаться от межсезонных химических очисток теплооборудования. Во многих случаях (для подавляющего большинства водогрейных котельных, для систем горячего водоснабжения) удается полностью отказаться от использования ионообменной водоподготовки и исключить сбросы хлоридов в окружающую среду. Периодичность химического контроля снижается в несколько раз.*

*Для достижения положительных результатов необходимо строго соблюдать все требования к ведению технологического процесса, регулярно осуществлять химико-аналитический контроль водно-химического режима. Главным же условием является использование только лицензионного оборудования и технологической документации.*

#### Литература

1. Чаусов Ф.Ф., Раевская Г.А., Плетнев М.А. и др. Применение комплексон-7 при обработке воды для паровых котлов // Экология и промышленность России. 2003. Июнь.
2. Чаусов Ф.Ф., Плетнев М.А., Казанцева И.С. и др. Экономичный метод очистки отопительных котельных с использованием комплексон-7 // Экология и промышленность России. 2004. Июль.
3. Потапов С.А. Предотвращение накипобразования и коррозии в системах теплоснабжения при работе на жесткой недеаэрированной воде, стабилизированной Композицией ККФ // "Новости теплоснабжения", 2002, № 3 (19).
4. Tomson M.B., Fu G., Watson M.A., Kan A.T. Mechanism of mineral scale inhibition. SPE Scale symposium, Aberdeen, 2002.
5. Петрова Е.В. Рост и растворение кристаллов моногидрата оксалата кальция. Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 2004.
6. Чаусов Ф.Ф., Раевская Г.А. Комплексонный водно-химический режим теплоэнергетических систем низких параметров. Практическое руководство. 2-е изд. Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2003.
7. Чаусов Ф.Ф. Ингибирование роста кристаллов солей щелочно-земельных металлов в водных растворах. Теория и технические приложения. Автореф. дисс. ... канд. хим. наук. Нижний Новгород: ННТУ, 2005.
8. Xiao J.J., Kan A.T., Tomson M.B. The role of calcium phosphino-polycarboxylate complexation in inhibiting BaSO<sub>4</sub> precipitation from brine // "Advanced on crystal growth inhibitor technologies", ed. by Z. Amjad. N.-Y.: Kluwer Academic. Plenum Publishers, 1999. ■

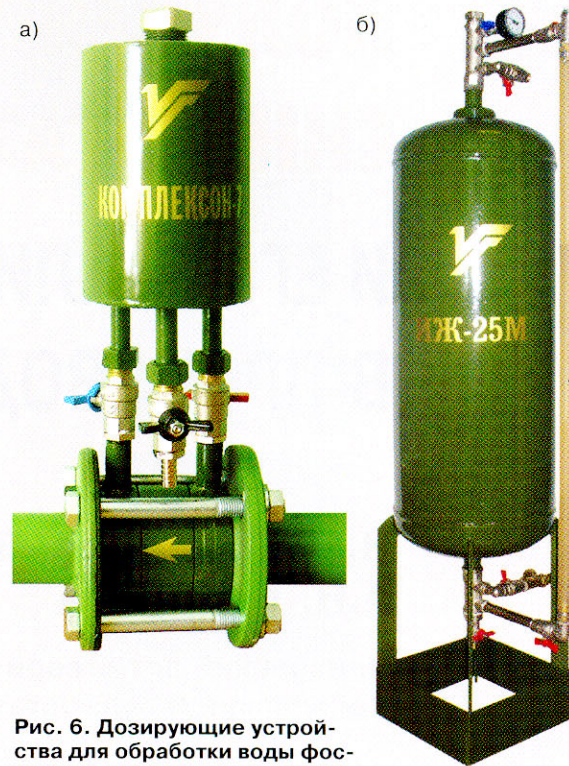


Рис. 6. Дозирующие устройства для обработки воды фосфонатами "Комплексон-7" (а) и "Иж-25" (б)