

ГАРАНТИРОВАННОЕ КАЧЕСТВО ВОДЫ ОТ ВОДОЗАБОРА К ПОТРЕБИТЕЛЮ – ЭКОЛОГИЧНЫЙ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ПУТЬ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ВОДОТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ОТРАСЛИ

Проанализированы качество воды от водозабора к системам водотеплоснабжения, а также возможность уменьшения коррозионности жидкой среды и интенсивности ее накипеобразования путем применения размельченных активированных экологических кристаллов.



М.Н. Торопов

Ключевые слова: вторичное загрязнение, водозабор, ремонтные предприятия, подвижной состав, коррозионная активность жидкой среды, интенсивность накипеобразования, расход ТЭР

EDN: ERFGOR

Взаимосвязь качества воды с состоянием элементов систем водотеплоснабжения

Если говорить о качестве воды в трубопроводах, переносящих воду от источника водоснабжения к потребителю, то оно зависит от соответствия ее физико-химических и санитарно-бактериологических показателей на указанном маршруте нормативным документам. Для транспортного комплекса схема движения воды, к примеру, поставляемой Мосводоканалом, укрупненно представлена на рис. 1.

Схема подчеркивает роль вторичного загрязнения воды в изменении ее санитарно-эпидемиологических показателей в трубопроводных системах в конечной точке у потребителя.

Важным этапом в развитии указанной схемы является контроль качества воды на всех этапах ее движения.

Укрупненно можно представить и следующую схему взаимосвязи отдельных элементов системы водотеплоснабжения отрасли, объединенных качеством

воды в водозаборе, на ремонтных предприятиях, в подвижном составе и у пассажира (рис. 2).

Так, в водозаборе качество воды определяется ее физико-химическими и санитарно-бактериологическими показателями в соответствии с требованиями СанПиН 2.1.3684-21.

Но для увеличения ресурса эксплуатации трубопроводов, оборудования ремонтных предприятий и подвижного состава, а также сохранения физического здоровья пассажира этого недостаточно.

Кроме перечисленного целесообразно учитывать:

- коррозионную активность водной (жидкой) среды;
- интенсивность ее накипеобразования (по существу адгезионные свойства);
- спектральные показатели воды, определяющие размер частиц взвесей;
- окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) воды, влияющий на жизнедеятельность человеческого организма.

Торопов Михаил Николаевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией кафедры «Электропоезда и локомотивы» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: прочность и надежность конструкций, улучшение качества воды. Автор более 170 научных работ.



Рис. 1. Укрупненная схема движения воды от источника водоснабжения к потребителю для транспортного комплекса (столичный регион)

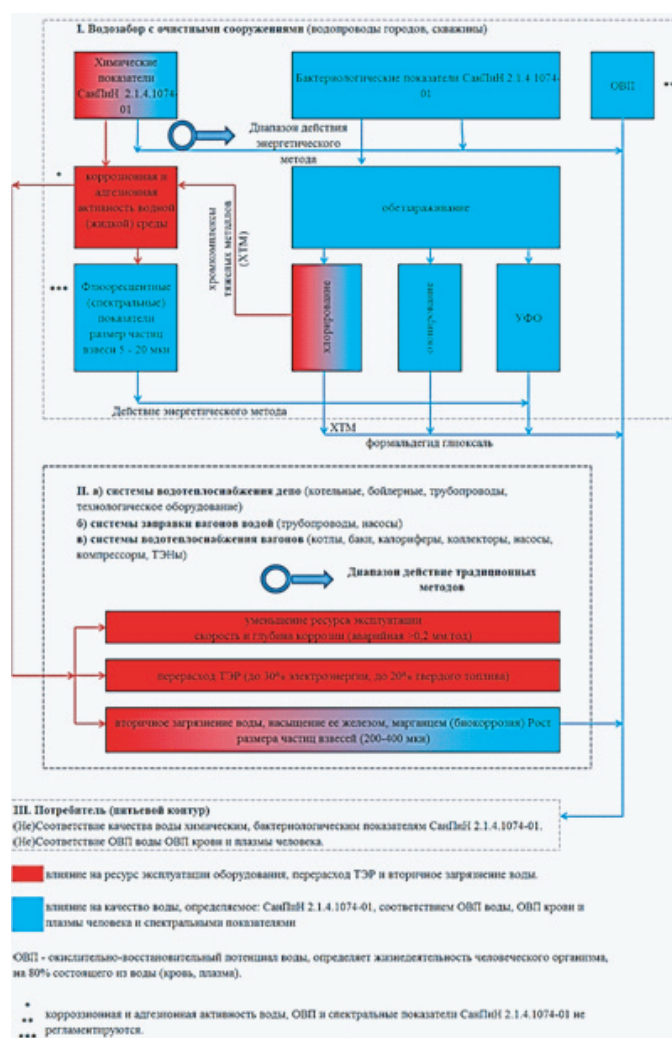


Рис. 2. Взаимосвязь отдельных элементов системы водотеплоснабжения, в том числе, ремонтных предприятий и подвижного состава

Всего этого в СанПиНе нет! Да и не может быть. К примеру, кальций и магний. Человек без них жить не может, а для труб — это злейшие враги. Такая многофакторность явлений усложняет проблему и настойчиво требует разработки и принятия нестандартных решений.

В схему, представленную на рис. 2, предлагаемые к учету показатели качества воды, введены. Введено и требуемое нормативами обеззараживание воды, а именно хлорирование, озонирование и ультрафиолетовое облучение. Учтены и особенности предлагаемых методов обеззараживания [1].

В частности, при использовании жидкого хлора, по мнению американских исследователей, в воде образуется более 260 канцерогенных галогенсодержащих соединений (ГСС). Использование гипохлорита натрия приводит в ряде случаев к интенсификации образования ГСС. Озонирование образует опасные для здоровья человека продукты, к тому же коррозионно активные, что требует применения дополнительных мероприятий [1].

Анализ взаимосвязи водозабора с системами водотеплоснабжения ремонтных предприятий (котлы, бойлеры, трубопроводы, технологическое оборудование), системами заправки вагонов водой (трубопроводы, насосы), системами водотеплоснабжения и калориферными ветвями пассажирских вагонов, системами охлаждения дизелей тепловозов свидетельствует о том, что в реальности без проведения специальных мероприятий в вышеуказанных системах происходит:

- уменьшение ресурса эксплуатации за счет процессов электрохимической и микробиологической коррозии при ее скоростях в 2–8 раз превышающих аварийные значения (0,2 мм/год);
- перерасход топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) (топлива, электроэнергии);
- вторичное загрязнение воды железом, марганцем, при увеличении размера частиц во взвесах (до 200–400 микрон).

В конечном пункте системы у потребителя суммирование вышеуказанных факторов определяет соответствие качества воды химическим и бактериологическим показателям согласно СанПиН 2.1.3684-21. При этом ОВП питьевой воды определяется его соответствием ОВП крови и плазмы человека. Именно этот фактор определяет усвоение питательных веществ на клеточном уровне организмом человека.

Для получения положительных, с точки зрения нормативных документов, результатов, на всех этапах представленной схемы целесообразно использовать технологии водоподготовки, способные уменьшить или устранить негативные факторы с минимально воз-

можными затратами. При разработке такого подхода к решению проблемы должны учитываться конструктивные, технологические, технико-экономические особенности систем водотеплоснабжения отрасли.

К примеру, в табл. 1 они приведены для систем водотеплоснабжения пассажирских вагонов при энергетическом методе водоподготовки (ЭМВ).

Кроме того, целесообразно учитывать реальное состояние систем (степень износа, химические и бактериологические анализы воды, класс потребляемой воды, расход ТЭР и т.д.). На рис. 3 приведены характерные примеры состояния систем водотеплоснабжения отрасли.

Должны учитываться также коррозионная активность и интенсивность накипеобразования воды на ремонтных предприятиях, системах заправки подвижного состава водой и в самом подвижном составе.

Отмечено, что на исследуемых объектах скорость коррозии превышает аварийные значения (0,2 мм/год) в 2–8 раз, интенсивность накипеобразования — в 2–6 раз. При этом толщина отложений варьируется от 2 до 12 мм [2].

Анализ воды проводился в Северном, Северо-Западном, Центральном-Черноземном, Центральном, Северо-Кавказском, Приволжском, Приуральском, Уральском, Восточно-Сибирском и Дальневосточном регионах РФ, а также за границей в пунктах заправки вагонов водой.

Состояние внутренних барабанов котлов и трубопроводов, определяющее в частности характер проблемы в отрасли, представлено на рис. 4.

При таком состоянии объектов теплоэнергетики наблюдается следующая зависимость перерасхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) от толщины накипно-коррозионных отложений (рис. 5).

Как видно из рис. 5, при толщине отложений, например, 5 миллиметров, перерасход ТЭР составит более 30%. К тому же в реальных условиях на пассажирском вагонном парке была установлена зависимость расхода ТЭР на отопление вагонов и интенсивности коррозионных процессов в трубопроводах от качества исходной воды [3]. Оно анализировалось в пунктах заправки вагонов водой на Северном направлении (Москва — Вологда, Воркута, Архангельск) и Восточном (Москва — Киров, Чита, Пекин, Улан-Батор). При этом учитывали и расход ТЭР на отопление и скорость коррозии в системах водотеплоснабжения самих вагонов, курсировавших по этим направлениям.

Перерасход ТЭР по Северному направлению составил 29,7%, скорость коррозии — 0,26 мм/год (при аварийной скорости 0,2 мм/год). Соответственно по Восточному направлению перерасход ТЭР — 10,6%,

Таблица 1

Конструктивные, технологические, технико-экономические особенности систем водотеплоснабжения пассажирских вагонов, учитываемые при ЭМВ

Конструктивные особенности	1	Взаимосвязанные калориферно-отопительный, питьевой контуры и контур ГВС. Объем контура теплоснабжения $\approx 1,0 \text{ м}^3$, питьевого $\approx 2 \text{ м}^3$	
	2	Отопление: а — высоковольтное 3000 В; б — электрическое 50–110 В; в — твердое топливо	
Технологические особенности	1	Требования к покрытиям	Малоцикловые вибрационные нагрузки исключают покрытия из хрупких материалов (стекло, керамика)
	2		Электропроводность и теплопроводность трубопроводов и ТЭНов не должны меняться при нанесении покрытий
	3		Геометрические размеры систем и оборудования не должны меняться при нанесении покрытий
	4	Ограниченные площади вагона исключают применение громоздкого дополнительного технологического оборудования	
	5	Фактическое состояние водной среды	Заправка вагонов водой в пунктах экипировки
	6		Двух-четырехкратное превышение ПДК ряда элементов в трубопроводах. Увеличенный размер взвесей (300–400 мкн вместо 5–20 мкн). Это уменьшает эффективность применения ультрафиолетового облучения, ультразвука, магнитных воздействий
	7		Высокая коррозионная активность воды в системе
Технико-экономические особенности*	1	Перерасход электроэнергии и топлива (10–30%) на отопление	
	2	Большие затраты материальных и трудовых ресурсов на деповской и капитальный ремонт	
	3	Применение основного и дополнительного технологического оборудования	
	4	Использование электроэнергии	
	5	Использование технической воды и других материальных ресурсов	
	6	Включение антикоррозионной и антиадгезионной обработки в технологический процесс деповского и капитального ремонта	
	7	Сброс солей со сточными водами в канализацию	

* Учитывают затраты энергетических, трудовых и других материальных ресурсов на достижение результата

скорость коррозии 0,12 мм/год. То есть на Северном направлении перерасход ТЭР на отопление и скорость коррозии в два раза выше, чем на Восточном. Полученный результат связан с различной интенсивностью накипеобразования и коррозионностью воды в пунктах заправки вагонов на указанных направлениях.

Интересно было проанализировать, на сколько учитывается фактор вторичного загрязнения в повышении энергоэффективности зданий, в том числе и жилых. По мнению специалистов, [4], в существующих нормативных документах экономически оптимально для всех регионов увеличить толщину имею-

щихся утеплителей в стенах примерно в полтора раза по отношению к базовому уровню. При этом ограждения по сопротивлению теплопередаче будут все еще ниже европейских, несмотря на большую суровость российских зим [4, стр. 15].

Но вопрос в том, как в существующих нормативных документах учитывается уменьшение теплопроводности трубопроводов при отоплении зданий с использованием воды с разной интенсивностью накипеобразования и коррозионной активностью?

В табл. 2 приведены численные значения коэффициентов теплопроводности различных видов накипи.



Рис. 3. Состояние объектов теплоэнергетики в транспортном комплексе

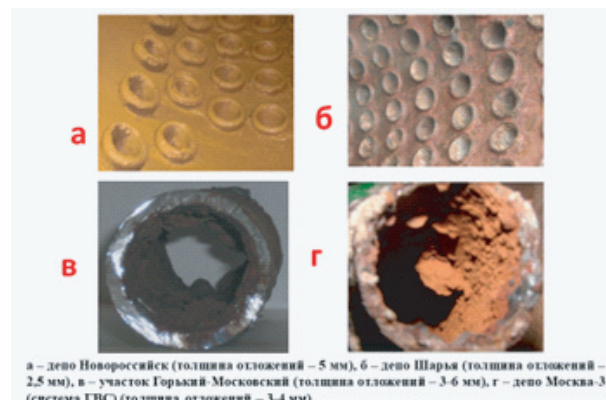


Рис. 4. Состояние внутренних барабанов котлов и трубопроводов

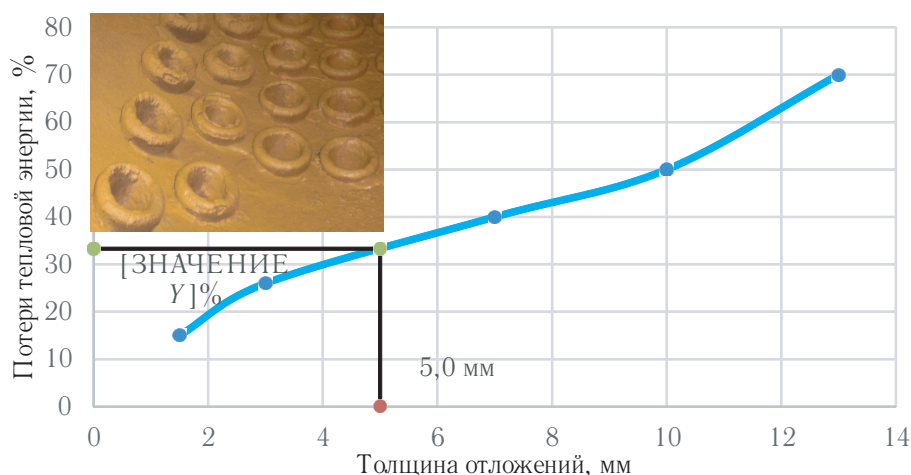


Рис. 5. Зависимость перерасхода ТЭР (потери мощности) от толщины накипно-коррозионных отложений (по данным фирмы «Lifescience Products LTD», Великобритания)

Как следует из табл. 2, коэффициент теплопроводности накипно-коррозионных отложений составляет от 0,1 до 3,0 Вт/(м·°С), при коэффициенте теплопроводности трубной стали 55 Вт/(м·°С). Коэффициент теплопроводности стали в 18,3–550 раз выше коэффициентов теплопроводности различных отложений. Таким образом, отложения приводят к перерасходу ТЭР и возникновению термических напряжений в конструкциях, значительно уменьшая их надежность и ресурс [6].

Основные причины увеличения затрат при ремонте и эксплуатации систем водотеплоснабжения — это высокие агрессивность среды (скорость коррозии в 2–8 раз выше аварийной) и интенсивность ее накипеобразования, повышенное содержание в воде железа (на некоторых объектах превышение ПДК в 10–13 раз), повышенная общая жесткость, солесодержание (табл. 3).

Причем устранить все основные причины, обуславливающие перерасход ТЭР и низкий ресурс систем в рамках единой технологии практически невозможно. Так, для уменьшения коррозионной активности воды необходимо использовать традиционные технологии антикоррозионной обработки. В случае высоких соле-содержания, жесткости, щелочности применяемой воды необходимо включить в сеть водоподготовки специализированное дорогостоящее оборудование и использовать существующие технологии умягчения.

В виду этого возникали следующие вопросы:

- как при таком состоянии систем привести в соответствие нормативам качество воды в питьевом контуре водопроводов, систем водоснабжения пассажирских вагонов? Туда не запустишь поверхностно активные вещества (ПАВ), комплексоны, химреагенты.
- как не повредить конструкции из цветных металлов, пластика, резины?

Таблица 2

Коэффициенты теплопроводности различных накипных отложений [5]

Вид накипи и ее химический состав	Характер накипи	Теплопроводность, Вт/м·°С
Накипь, пропитанная маслом	Твердая	0,10–0,15
Силикатная с содержанием кремнекислых соединений 20 % и выше	Твердая, плотная	0,25–0,50
Карбонатная с содержанием CaCO_3 и MgCO_3 до 70 %: • аморфного типа • твердого типа	Мягкая От аморфного порошка до твердого камня	0,20–1,00 0,50–5,50
Сульфатная (гипсовая) с содержанием гипса (CaSO_4) более 50 %	Твердая, плотная	0,50–2,50
Смешанная, состоящая из гипса, карбонатов кальция (CaCO_4), магния (MgCO_4), а также силикатов кальция (CaSiO_4) и магния (MgSiO_4 , окислов железа и алюминия	Твердая, плотная	0,80–3,00

• как быть с ограниченными площадями вагонов, на которых умещается весь дом и нет места для дополнительного технологического оборудования (дозаторов, магнитных, ультразвуковых систем и т.д.)?

• как повысить ресурс стальных водотеплотрасс, по крайней мере, до 50–70 лет?

• как все это выполнить в рамках единой технологии?

Выход один. Традиционные технологии действуют на следствие: они осуществляют очистку от накипно-коррозионных отложений, а надо воздействовать на причину, улучшая качество воды, уменьшая ее коррозионную активность и склонность к накипеобразованию, что СанПиНом не регламентируется.

При этом целесообразно применять либо механические, либо гидромеханические способы активации химических процессов в системах водотеплоснабжения, используя для этого природные вещества, разрешенные для введения в питьевую воду, в том числе в качестве катализаторов химических процессов. По существу, такие вещества должны быть изомерами, то есть имеющими один и тот же состав, но при определенных условиях обладающими различными физико-химическими свойствами.

Физическая сущность энергетического метода водоподготовки

Интерес к механическим методам ускорения химических реакций, особенно между твердыми телами, начал проявляться в конце позапрошлого века. Первым ученым, уделившим значительное внимание этим процессам был Д.И. Менделеев [7]. За прошедшие почти полтора столетия интерес к этой задаче не иссяк. Возникло целое научное направление, которое Менделеев окрестил как механохимия и обширная литературная база. Приведем некоторые источники из нее [8–11].

С помощью измельчения твердых тел могут быть решены самые разнообразные задачи, в частности, изменение структуры, ускорение твердофазных реакций и т.д. [9]. Установлено, что в результате активации часть механической энергии, подведенной к твердому телу, усваивается им в виде новой поверхности линейных и точечных дефектов [9]. Кроме того, известно, что химические свойства кристаллов определяются наличием в них дефектов, их природой и концентрацией. Все указанные процессы происходят на границе фаз. Но задача в случае использования вышеуказанных процессов в системах водотеплоснабжения

Таблица 3

**Причины увеличения затрат при эксплуатации и ремонте систем водотеплоснабжения
пассажирских вагонных депо и участков и методы их устранения**

№ п/п	Причины увеличения затрат	Допустимые, критические зна- чения, ПДК (нормативные доку- менты)	Фактические значения по ремонтным предприятиям ОАО «ФПК»	Статьи затрат	Методы устранения, «смягче- ния» проблемы
1	Коррозионность водной среды	1. 0,2 мм/год – аварийная $V_{кор}$. 2. 0,085 мм/год – допустимая $V_{кор}$. 3. Допустимая величина утонения трубопровода от коррозии – 20 %.	Из 31 объекта на 29 $V_{кор}$ превышает аварийную в 1,3–8,0 раз. На 2 объектах $V_{кор}$ в 2,0–2,5 раза больше допустимой	Уменьшение ресурса эксплу- атации. Замена трубопроводов при утонении до 20%. Перерасход ТЭР	Проведение периодиче- ской антикоррозийной обработки, постоянные затраты электроэнергии, материалов, воды, при- менение дополнительного оборудования при превы- шении допустимой $V_{кор}$
2	Склонность водной среды к накипееобразо- ванию	Удельная загрязненность отло- жениями к моменту остановки на чистку не превышает: 500 г/м ² – при работе на газо- образном и твердом топливе; 300 г/м ² – на жидком топливе; 1000 г/м ² – для водогрейных котлов Толщина отложений не должна превышать 0,5 мм при остановке на чистку	1. На 5 объектах до 200 г/м ² в год. 2. На 10 – до 400 г/м ² в год. 3. На 7 – до 600 г/м ² в год. 4. На 9 – от 1000 до 3000 г/м ² в год. 5. Толщина отложений от 0,4 до 7–10 мм	Уменьшение ресурса эксплу- атации. Перерасход ТЭР до 20%	Проведение антиадгезион- ной обработки
3	Содержание железа, мг/л	ПДК=0,3 мг/л	На некоторых объектах пре- вышение ПДК в 10–13 раз	Уменьшение ресурса эксплу- атации. Перерасход ТЭР	Обезжелезивающие уста- новки
4	Жесткость общая	До 5,0 мг-экв/л	На некоторых объектах 5,3–6,8 мг-экв/л	Уменьшение ресурса эксплу- атации. Перерасход ТЭР	Умягчение воды
5	Солесодержание, мг/л	До 3000 мг/л	На 6 объектах от 3500 до 10000 мг/л.	Уменьшение ресур- са эксплуатации. Перерасход ТЭР	Уменьшение солесодер- жания

Энергетический метод. Одинократная обработка сроком на 5–7 лет

усложняется наличием жидкости и сам процесс идет на граница фаз «жидкость — поверхность». Отсюда и возникает более усложненная трактовка механизма действия метода.

Механизм работы основан на адсорбции активированного тонкодисперсного материала, что приводит к возникновению нескомпенсированных сил межмолекулярного воздействия на границе раздела твердой и жидкой фаз. В качестве механизма компенсации на разделе фаз образуется двойной электрический слой (ДЭС) [12]. Любое внешнее электрическое поле, направленное вдоль границы раздела фаз, вызывает смещение одного из ионных слоев, образующих ДЭС, по отношению к другому, что приводит к относительному перемещению фаз и к пространственному разделению зарядов (поляризация) в направлении движения и изменению вектора электрического потенциала (потенциал течения, потенциал оседания) [13]. Эти потенциалы отвечают за направленность реакций, диффузию, адсорбцию, хемосорбцию, сольватацию.

Если внести в слой раздела фаз кристаллические частицы с сильными дефектами кристаллических решеток (рис. 6), то есть имеющих в своей атомной структуре атомные и электронные вакансии, то при перемещении этих дефектных областей (дислокаций) по поверхности кристалла образуются дополнительные электрические поля, что позволяет при правильном подборе вещества кристаллов влиять не только на потенциал слоя скольжения, но и на потенциал диффузного слоя [11], то есть менять направленность и скорость реакций. Для этих целей нами применяются кристаллы инертных природных материалов (энергенты).

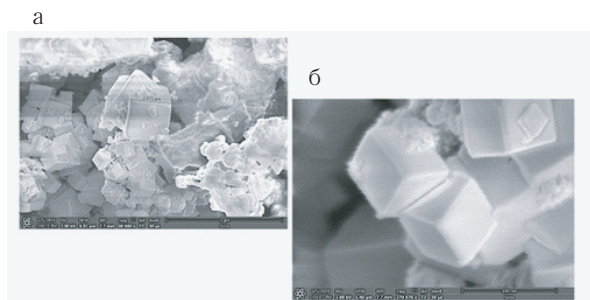


Рис. 6. Вид энергента при увеличении:
а – на 30 000; б – на 60 000

Кристалл при перемещении дислокаций по его объему или поверхности будет реагировать на это изменением своих линейных размеров (стрикция).

Вводимые нами в защищаемую систему деформированные кристаллы имеют большой избыток энергии, а ее минимизация протекает медленно. Как показала практика, мы можем рассчитывать на работоспособность кристалла в течение, по крайней мере, 5–7 лет.

Наличие блуждающих электрических полей от движения дислокаций и эффекта стрикции объясняет не только причину разрыхления и разрушения накипнокоррозионных отложений в области нахождения кристалла, но и причину и способ переноса кристалла по всей поверхности защищаемого объема, а также причину появления защитной пленки (рис. 7,8) с низкой адгезией к загрязнениям на очищаемой поверхности при инертности метода по отношению к любым конструкционным материалам.

В результате обработки под отложениями образуется защитная оксидная пленка, представляющая собой сложный оксид ряда металлов (рис. 7).

Известны, образующиеся при ряде технологий: магнетитная (Fe_3O_4), карбонатная пленка, пленка из поверхностно активных веществ (ПАВ), покрытия из алифатических аминов. Физико-механические свойства этих покрытий, значительно уступают свойствам сложного оксида. Кроме того, нанесение его на поверхность конструкций более экологично. Оно возможно и на питьевом контуре без прерывания технологического процесса.

Пример. В случае применения как ПАВ, так и ЭМВ на поверхности оборудования контактирующей



Рис. 7. Этапность технологического процесса обработки системы с толщиной отложений более 3 мм энергетическим методом

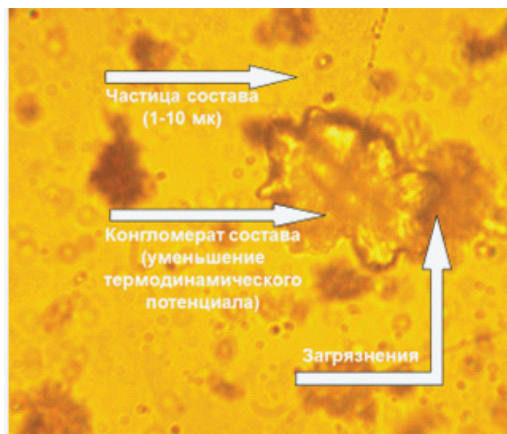


Рис. 8. Механизм воздействия ЭМВ на процессы удаления накипно-коррозионных отложений и формирование защитной пленки

с теплоносителем образуется гидрофобное покрытие (рис. 9). В первом случае она скатывается с поверхности, что свидетельствует о гидрофобности покрытия, во втором впитывается им (гидрофильность). Но в отличие от ЭМВ, ПАВ запрещены для сброса в канализацию.

Как показал опыт, при образовании такой пленки в результате ЭМВ даже при содержании взвесей в системе до 150 мг/л, последние не пристаю́т к металлу. И только после образования пленки начинается процесс очистки от отложений. Вначале удаляется поверхностный рыхлый слой, затем — плотный пристенный. Процентное соотношение этих слоев по толщине различно. Сделать вывод о законченности процесса обработки могут только специалисты на основании глубокого анализа данных. Визуальное наблюдение является недостаточным для принятия взвешенных решений при многообразии внешних и внутренних факторов, сопровождающих процессы формирования пленки и очистки системы [14].

Заключение

Энергоэффективность и экологичность эксплуатации объектов теплоэнергетики, систем водотеплоснабжения, калориферных ветвей систем водоохлаждения подвижного состава и промышленного оборудования зависят от качества воды в технологической цепочке — от водозабора до потребителя (ремонтные предприятия, подвижной состав, пассажир). Так в конечной точке отмечено увеличение показателей коррозионности водной среды по сравнению с допустимыми значениями в 25–30 раз, интенсивности накипеобразования — в 1,5–2 раза, солесодержания — в 5–6 раз, содержание железа — в 10–13 раз. Это приводит к перерасходу ТЭР на объектах теплоэнергетики отрасли на 25–30%, в подвижном составе до 30%, резко снижая ресурс эксплуатации систем за счет запредельной скорости коррозии, ставя под угрозу здоровье пассажиров из-за некачественной воды в питьевом контуре.

Для решения указанной проблемы разработан новый подход, учитывающий ее многофакторность, а именно коррозионную активность жидкой (водной) среды, интенсивность ее накипеобразования; конструктивные, технологические, технико-экономические особенности систем, спектральные показатели, ОВП, класс исходной воды, степень износа, водно-химический режим (ВХР) в различных точках системы от водозабора до потребителя.

Такой подход позволяет экологично решить проблему и в питьевом контуре, не разрушая любые конструкционные материалы, на любой жидкости (пресная, соленая вода, низкотемпературные жидкости, химвещества, нефть и т.д.), повышая ресурс стальных трубопроводов по крайней мере до 50–70 лет. И все это в рамках единой технологии.

Механизм работы мелкодисперсных минералов, разрешенных Роспотребнадзором для водоподготовки на питьевом контуре, основан на возникновении на границе фаз «жидкость — поверхность» двойного

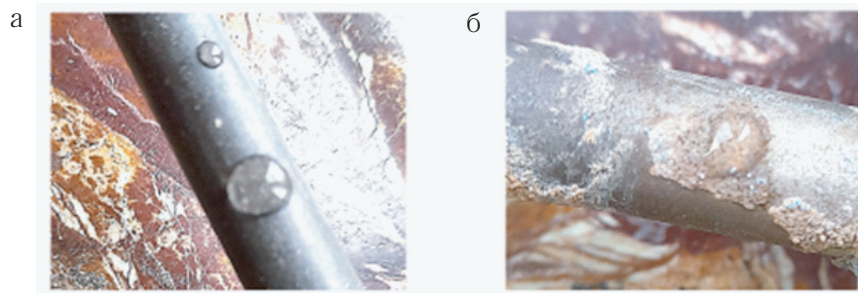


Рис. 9. Капля жидкости на образовавшейся после ЭМВ защитной пленке (а) и на отложениях (б)

электрического слоя. При введении в слой раздела фаз кристаллических частиц с дефектами кристаллических решеток (дислокация) возникает дополнительное электрическое поле, что позволяет при правильном подборе вещества кристалла влиять на потенциал диффузионного слоя, то есть менять направленность и скорость химических реакций. Это дает возможностькратно уменьшать скорость коррозии в системе и интенсивность напиеобразования. Вводимые в систему деформированные кристаллы имеют большой запас энергии, а ее минимизация происходит медленно. Как показал опыт, при образовании защитной пленки взвеси в системе, даже при их содержании до 150 мг/л, не пристаю к металлу.



Литература

1. Новиков, М.Г. Оценка эффективности обеззараживания воды для хозяйственно-питьевых целей различными реагентами / М.Г. Новиков, О.А. Продеус. - Текст : непосредственный // Инженерные системы. АВОК-Северо-Запад. - 2022. - № 2. - С. 28-34.
2. Продление ресурса эксплуатации и повышение энергоэффективности систем водотеплоснабжения и водоохлаждения / М.Н. Торопов, П.П. Бегунов, А.С. Селиванов, И.Е. Перков. - Текст : непосредственный // Инженерные системы. АВОК - Северо-Запад. - 2020. - № 1. - С. 60-67.
3. Торопов, М.Н. Взаимосвязь качества воды с экологичностью, безопасностью и энергоэффективностью при применении энергетического метода водоподготовки в системах водотеплоснабжения / М.Н. Торопов. - Текст : непосредственный // Инженерные системы. АВОК - Северо-Запад. - 2022. - № 2. - С. 36-45.
4. Ливчак, В.И. Повышение энергоэффективности зданий в России — гарантия ее устойчивого развития сейчас и потом / В.И. Ливчак. - Текст : непосредственный // Инженерные системы. АВОК-Северо-Запад. - 2022. - № 2. - С. 14-22.
5. Защита систем водотеплоснабжения от накипных и коррозионных отложений методом термодинамической активации воды / В.М. Круглов, М.Н. Торопов, В.Н. Жилин [и др.]. - Текст : непосредственный // Безопасность труда в промышленности. - 2004. - № 10. - С. 19-22.
6. Торопов, М.Н. Энергоэффективная, экологичная технология повышения надежности и ресурса систем водотеплоснабжения / М.Н. Торопов, И.Е. Перков, П.П. Бегунов. - Текст : непосредственный // Инженерные системы. АВОК-Северо-Запад. - 2019. - № 1. - С. 34-42.
7. Менделеев, Д.И. Основы химии. - 13-е издание (5-е посмертное) / Д.И. Менделеев. - Т.1. Москва; Ленинград : Государственное научно-техническое издание химической литературы, 1947. - 620 с. - Текст : непосредственный.
8. Болдырев, В.В. Механохимия твердых неорганических веществ / В.В. Болдырев, Е.Г. Аввакумов. - Текст : непосредственный // Успехи химии, 1971. - Т. XL. - Вып.10. - С. 1835-1856.
9. Аввакумов, Е.Г. Механические методы активации химических процессов / Е. Г. Аввакумов; Отв. ред. А. С. Колосов; АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т химии твердого тела и перераб. минер. сырья. - 2-е изд., перераб. и доп. - Новосибирск : Наука : Сиб. отд-ние, 1986. - 305 с. - Текст : непосредственный.
10. Федоров, В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. / В.В. Федоров. - Ташкент : Фан, 1979. - 168 с. - Текст : непосредственный.
11. Гегузин, Я.Е. Диффузионная зона / Я.Е. Гегузин. - Москва : Наука, 1979. - 343 с. - Текст : непосредственный.
12. Особенности процессов релаксации электретных зарядов в гидратированных силикатах / Я.В. Безрукова [и др.]. - Текст : непосредственный // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. - 3-2', 2012, - С. 51-56.
13. Киселёв В.Г. Влияние емкости двойного электрического слоя на скорость коррозии на границе раздела фаз / В.Г. Киселёв. - Текст : непосредственный // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. - 3-2', 2012, - С. 56-61.
14. Некоторые технико-экономические аспекты применения энергетического метода водоподготовки в системах водотеплоснабжения / М.Н. Торопов, П.П. Бегунов, А.С. Селиванов, Н.В. Васильев, И.Е. Перков. - Текст : непосредственный // Инженерные системы. - АВОК-Северо-Запад. - 2021. - № 1. - С. 46-54.

