

УДК 628.164

## МЕТОДЫ УДАЛЕНИЯ ИЗ ВОДЫ СОЛЕЙ КАЛЬЦИЯ И МАГНИЯ

REMOVAL METHODS FROM WATER OF SALTS  
OF CALCIUM AND MAGNESIUM

Горбань Яна Юрьевна,

ассистент, e-mail: [yana-42@mail.ru](mailto:yana-42@mail.ru)

Gorban Yana Yu., assistant

Черкасова Татьяна Григорьевна,

доктор химических наук, профессор, e-mail: [ctg.hntv@kuzstu.ru](mailto:ctg.hntv@kuzstu.ru)

Cherkasova Tatyana G., doctor of chemical sciences, professor

Неведров Александр Викторович,

кандидат технических наук, доцент, e-mail: [nevedrov1978@rambler.ru](mailto:nevedrov1978@rambler.ru)

Nevedrov Alexander V., C.Sc. (Engineering), associate professor

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,  
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

**Аннотация:** В статье рассмотрены пути решения поддержания внутренних поверхностей нагрева теплофикационного оборудования в безнакипном состоянии, что на данный момент времени является актуальной задачей. Проанализированы применяемые на практике химические и физические способы умягчения воды: реагентные, ионообменные и мембранные методы, магнитная обработка воды. Изучен технологический процесс рассмотренных метод, подбор которых зависит от изначального качества воды и необходимого уровня умягчения. В результате чего были выявлены различия между методами по степени эффективности защиты теплофикационного оборудования от накипи. Выполнены лабораторные исследования по изучению влияния обработки воды электромагнитным полем на накипеобразование при различных значениях напряженности магнитного поля в замкнутой и в открытой системе. Обработка воды электромагнитным полем осуществлялась путем пропускания ее через межполюсное пространство электромагнита перпендикулярно магнитным силовым линиям. Из полученного анализа результатов, сделаны следующие выводы о эффективности применяемого метода: с увеличение напряженности магнитного поля возрастает эффективность защиты водогрейного оборудования от накипи; эффективность антинакипной защиты водогрейного оборудования при обработке воды электромагнитным полем в открытых системах меньше, чем в замкнутых циклах.

**Abstract:** The article discusses ways to address the maintenance of internal heating surfaces of heating equipment in beznakipnom state that at this point in time is an important task. Analyzes applied in practice, chemical and physical methods of water softening: reagent, ion exchange and membrane techniques, magnetic water treatment. Studied process discussed method, the selection of which depends on the initial water quality and desired level of softening. As a result, differences were found between the degree of protection methods for the efficiency of heating equipment from scale. Performed laboratory studies on the effect of electromagnetic field of water treatment on the scale formation at different values on-the magnetic field intensity in a closed and in an open system. Water Treatment electromagnetic field was carried out by passing it through the pole area of the electromagnet is perpendicular to the magnetic field lines. From the obtained results of the analysis, the following conclusions about the effectiveness of the method used: to increase the strength of the magnetic field increases the effectiveness of protection against scale water-heating equipment; antinakipnoy protection efficiency hot water in water treatment equipment electromagnetic field in open systems behind closed cycles.

**Ключевые слова:** водоподготовка, накипеобразование, умягчение воды, реагентный метод, ионообменный метод, мембранный метод, магнитная обработка.

**Keywords:** water treatment, scale formation, water softening, reactant method, ion exchange method, membrane method, magnetic treatment.

На предприятиях тепловой энергетики для возмещения потерь горячей воды, связанных с ее бытовым и производственным использованием системы горячего водоснабжения подпитывают

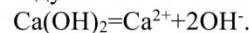
свежей водой из природных источников. Природная вода в силу множества причин не бывает физически и химически чистой. В ней всегда имеются примеси, состоящие из глины, песка, мелких

водорослей и других частиц во взвешенном состоянии нерастворимых в воде. Кроме того, загрязнение воды может происходить из-за коррозии водоподогревательного и пароводяного тракта, неплотностей в вальцовочных соединениях и сальниковых уплотнениях теплотехнического оборудования. Поэтому для того чтобы предотвратить выпадение ила, шлама и накипи производят специальную водоподготовку[1].

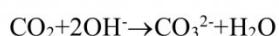
При очистке воды от нерастворимых в ней примесей используют разнообразные отстойники, фильтры и другие устройства. Более сложно очистить воду от химических примесей. В настоящее время используются множество методов устранения из воды солей кальция и магния (умягчение). Под умягчением воды понимают либо устранение, либо уменьшение ее жесткости. Главным образом оно заключается в полном или частичном удалении из нее катионов  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$ . Согласно нормам ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая», содержание солей жесткости в воде не должно превышать 7 мг-экв/л, однако, используя воду в теплообменных системах необходимо ее глубокое умягчение. Умягчение воды можно осуществить несколькими способами. Подбор каждого зависит от изначального качества воды и необходимого уровня умягчения. Выделяют несколько основных химических и физических способов умягчения воды: реагентные, ионообменные и мембранные методы, магнитная обработка воды.

В практике водоподготовки применяется ряд методов обработки воды реагентами с целью связывания содержащихся в воде катионов жесткости в малорастворимые соединения, выделяемые затем из воды в твердом состоянии. Образованные таким образом соединения удаляются затем из воды путем ее отстаивания и фильтрования. Реагентное умягчение воды производят как без подогрева, так и с ее подогревом. Выделяют наиболее применяемые методы: известковый, известково-содовый, едкогидрокарбонатный, фосфатный, бариевый, оксалатный.

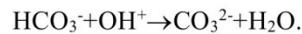
При известковании в природную воду добавляют  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - гашенную известь. Данный реагент один из наиболее дешевых и находит применение для умягчения воды с высокой карбонатной и невысокой некарбонатной жесткостью, а также в случае, когда не требуется удалять из воды соли некарбонатной жесткости. Гашеная известь используется в виде раствора или в виде суспензии (молока), которую вводят в предварительно подогретую обрабатываемую воду. Растворясь, известь обогащает воду ионами  $\text{OH}^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$ :



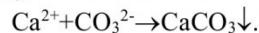
Обогащение воды ионами  $\text{OH}^-$  приводит к связыванию растворенной в воде свободной углекислоты:



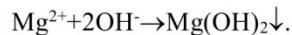
и к переходу гидрокарбонатных ионов в карбонатные:



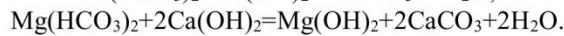
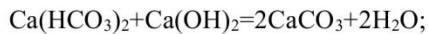
Повышение концентрации ионов  $\text{CO}_3^{2-}$  в обрабатываемой воде и наличие в ней ионов  $\text{Ca}^{2+}$ , как содержащихся в исходной воде, так и введенных с известью, приводит к повышению произведения растворимости и выделению в осадок малорастворимого  $\text{CaCO}_3$ :



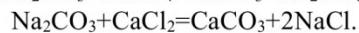
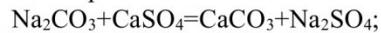
При дозировке извести в большем количестве, возникает осаждения ионов кальция и связывания свободной углекислоты, осаждается гидроксид магния:



Известково-содовый метод предполагает добавление в воду  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  - гашеную известь и соду. Оба реагента – сода и известь – вводят в воду одновременно или поочередно. Соли карбонатной, временной жесткости удаляются известью, не карбонатной, постоянной жесткости – содой. При этом химические реакции удаления карбонатной жесткости протекают следующим образом:

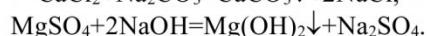
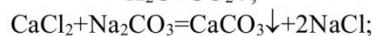
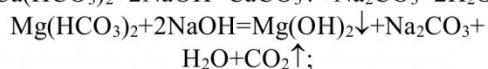
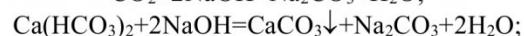
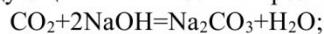


удаление некарбонатной жесткости:



В результате реакции получается углекислый кальций, который выпадет в осадок. Эффект умягчения данным методом зависит от температуры воды и от соблюдения оптимальных доз реагентов. При подогреве воды до 80-90°C можно достичь более полного умягчения 0,2-0,4 мг-экв/л [2]. К недостаткам известково-содового способа можно отнести: 1) не полное умягчение воды; 2) громоздкость установки; 3) тщательная подборка дозы реагентов, что трудно достигается из-за нестабильности состава умягчаемой воды.

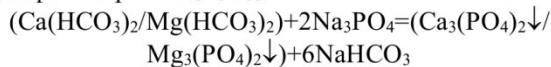
Едкогидрокарбонатный метод умягчения воды описывается следующими химическими реакциями [3]:



Едкий натр в процессе умягчения воды расходуется на устранение карбонатной и магниево-карбонатной жесткости, и нейтрализацию свободной углекислоты, а сода, образующаяся при распаде бикарбонатов ( $\text{HCO}_3^-$ ) и нейтрализации углекислоты, используется на удаление кальциевой некарбонатной жесткости. Глубина умягчения воды при едкогидрокарбонатном методе такая же, как и при известково-содовом, т. е. остаточная жесткость практически около 1 мг-экв/л, а при подогреве умягченной воды 0,2-0,4 мг-экв/л. Применяется данный способ редко из-за значительно высокой стоимости едкого натра.

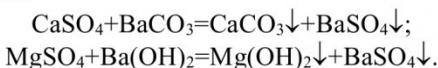
При фосфатном методе умягчения воды ис-

пользуется тринатрийфосфат  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  и гексаметафосфат натрия  $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$ :



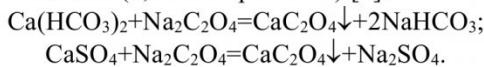
Сущность метода заключается в образовании кальциевых и магниевых солей фосфорной кислоты, которые обладают малой растворимостью в воде и поэтому достаточно полно выпадают в осадок. При подогреве воды до 105-150 °C можно достичь умягчения до 0,02-0,03 мг-экв/л. Из-за высокой стоимости реагента, метод обычно используют для доумягчения воды, предварительно умягченной другими методами.

Также в сочетании с другими с методами находит применение бариевый метод умягчения. В воду вводят сначала барийсодержащие реагенты ( $\text{BaCO}_3$ ;  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ;  $\text{Ba}(\text{AlO}_2)_2$ ) для устранения сульфатной жесткости, затем осветленную воду обрабатывают известью и содой для дальнейшего умягчения:



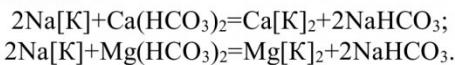
Данный метод не нашел широкого применения из-за высокой стоимости реагентов и токсичности бариевых солей.

Метод отличающийся простотой технологического и аппаратурного оформления – оксалатный метод умягчения воды, однако применяется ограниченно ввиду дороговизны реагента. Он основывается на малой растворимости в воде оксалата кальция  $\text{CaC}_2\text{O}_4$  (6,8 мг/л при 18 °C) [4]:



Одна из распространенных технологий умягчения воды на промышленных предприятиях на сегодняшний день – ионообменная. Метод ионного обмена основан на свойстве катионитов обменивать катионы, которыми предварительно «заряжены» его активные группы, на содержащиеся в обрабатываемой воде катионы кальция и магния. Традиционное применение в теплоэнергетике получили одно- и двухступенчатые схемы водоподготовки.

Обработка воды путем Na-катионирования заключается в фильтровании ее через слой катионита, содержащего в качестве обменных ионов катионы  $\text{Na}^+$  с образованием натриевых солей. Процесс может быть представлен следующими реакциями обмена:



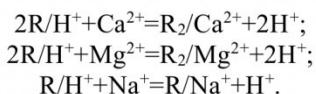
Как показывают эти реакции, катионит поглощает из воды катионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , обусловливающие жесткость, а в воду из катионита переходит два одновалентных иона  $\text{Na}^+$ , т.е. обмен ионами происходит в эквивалентных количествах. При использовании Na-катионирования содержание кальция и магния в воде может быть снижено, при одноступенчатой схеме – до 0,2-0,05 мг-экв/л и при двухступенчатой схеме – до 0,01 мг-экв/л.

Каждый свежий катионит имеет некоторую емкость по отношению к поглощаемым катионам, которую называют рабочей емкостью поглощения. Для ее восстановления необходимо извлечь из катионита задержанные катионы – регенерировать. Процесс регенерация истощенного катионита производится пропуском через него раствора поваренной соли, она применяется вследствие ее доступности и дешевизны [5].

К основным недостаткам метода относят: 1)неизменчивость величины щелочности умягчаемой воды; 2)неизменчивость анионного состава воды, т.е. присутствующие в исходной воде анионы  $\text{SO}_4^{2-}$ ;  $\text{Cl}^-$  и другие целиком переходят в умягчаемую воду; 3)высокий удельный расход соли на регенерацию; 4)неполное использование емкости поглощения катионита.

При работе Na-катионитовых фильтров встречаются случаи, когда карбонатная жесткость обрабатываемой воды превышает допустимую щелочность умягчаемой воды, то прибегают к дополнительным мерам по доведению щелочности до допустимых пределов. Чаще снижение щелочности воды достигается применением H-На-катионирования. В этом случае потребителем может быть достигнута требуемая величина щелочности или кислотности благодаря взаимной нейтрализации кислой и щелочной воды.

Обработка воды H-катионированием основана на фильтровании ее через слой катионита, содержащего в качестве обменных ионов катионы водорода:



При H-катионировании значительно снижается pH, так как образуются минеральные кислоты (серная, соляная, азотная, кремниевая) в количествах, эквивалентных содержанию сульфатов и хлоридов в исходной воде.

H-Na-катионитовый способ может осуществляться по трем схемам умягчения: параллельного, последовательного и совместного катионирования.

Схему параллельного H-Na-катионирования применяют в тех случаях, когда суммарная концентрация сульфатов и хлоридов в обрабатываемой воде не превышает 4, а натрия – 2 мг-экв/л. Основана данная схема на пропускании части воды через H-катионитовый, а другой – через Na-катионитовый фильтры. Образующиеся кислые и щелочные фильтраты смешиваются в определенно заданной пропорции, а выделяющийся при их взаимодействии  $\text{CO}_2$  удаляется на дегазаторах.

Схему последовательного H-Na-катионирования применяют при умягчении воды с повышенными жесткостью и солесодержанием. Сущность метода заключается в пропуске части воды через H-катионитный фильтр, затем ее смешивают с остальной водой и полученную смесь

пропускают через дегазатор для удаления CO<sub>2</sub>. После чего всю воду подают на Na-катионитный фильтр. Недостатком схемы является большой расход электроэнергии на проталкивание воды через последовательно включенные фильтры.

Схема совместного H–Na-катионирования осуществляется в одном фильтре, верхнем слоем загрузки которого является H-катионит, а нижним – Na-катионит [6].

Вышерассмотренные методы ионного обмена имеют ряд общих недостатков связанных с необходимостью использовать большое количество концентрированных щелочи и кислоты для восстановления обменной емкости ионитов. Это требует создания довольно сложного реагентного хозяйства, системы нейтрализации стоков, кислотной изоляции аппаратов, трубопроводов и арматуры, а так же приводит к образованию высокосолевых отходов, сброс которых ограничен. Причем расход реагентов, как правило, в 2–3 раза превышает стехиометрический, следовательно, увеличивается количество сбрасываемых солевых стоков. В результате чего на практике возникают сложности с соблюдением особых требований техники безопасности, а так же образуются высокие капитальные и эксплуатационные расходы.

В последние десятилетия для подготовки воды для теплоэнергетических нужд получили распространение мембранные технологии. В основе всех мембранных методов лежит перенос примесей или растворителей через мембранны. По движущей силе процесса разделения примесей и воды мембранные процессы разделяют на баромембранные (обратный осмос, нанофильтрация, ультрафильтрация, микрофильтрация) и электромембранные (электродиализ, электродеионизация). При использовании сил давления мембранны должны пропускать растворитель (воду), в максимальной степени задерживая ионные и молекулярные примеси. При использовании электрических сил мембранны должны быть проницаемы для ионов и не должны пропускать воду.

Метод обратного осмоса эффективно используется для подготовки питательной воды котлов высокого давления ТЭЦ, паровых котлов котельных, подпитки теплосетей и других целей. В основу метода положено явление осмоса самопроизвольного перехода растворителя через специальную полупроницаемую мембрану в раствор, а движущей силой процесса является разность между приложенным и осмотическим давлениями. Использование обратного осмоса дает возможность извлечь на одной ступени очистки до 96–98% солей. Однако эффективность процесса обратного осмоса в значительной мере зависит от свойств мембранны, которые должны отвечать следующим требованиям: обладать высокой разделяющей способностью (селективностью), высокой удельной проницаемостью, устойчивостью к действию рабочей среды, неизменностью характеристики

в процессе эксплуатации, достаточной механической прочностью, иметь низкую стоимость. Положительный опыт внедрения обратного осмоса на водоподготовительных установках имеется на ТЭЦ-12 ОАО «Мосэнерго», ТЭЦ-23 ОАО «Мосэнерго», Владимирской ТЭЦ, Калининской АЭС, Нижнекаменской ТЭЦ, Новосибирской ТЭЦ, Заинской ГРЭС, ОАО «Ивановские ПГУ», ТЭЦ ОАО «Северсталь», Уфимской ТЭЦ.

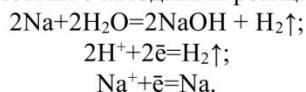
Перспективен в развитии относительно новый мембранный процесс – нанофильтрация. Нанофильтрационные мембранны имеют такой размер пор, который позволяет задерживать многовалентные ионы и органические вещества. Данный метод может быть использован для умягчения и частичного обессоливания (50...70%) воды для подпитки теплосетей, но широко применения на практике не получил.

Как все баромембранные технологии, процесс ультрафильтрации заключается в пропускании обрабатываемой воды через мембрану при сравнительно невысоких значениях давления: 0,3–1 МПа. К данному методу предъявляются гораздо более высокие требования к отводу от мембранный поверхности концентрированного раствора вещества, способного формировать в случае ультрафильтрации гелеобразные слои и малорастворимые осадки. Ультрафильтрацию в отличие от обратного осмоса используют для разделения систем, в которых молекулярная масса растворенных компонентов намного больше молекулярной массы растворителя. Например, для водных растворов принимают, что ультрафильтрация применима тогда, когда хотя бы один из компонентов системы имеет молекулярную массу от 500 и больше[7].

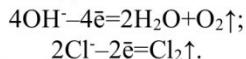
Применяемые установки для осуществления баромембранных процессов довольно прихотливы в эксплуатации, что не является положительной стороной. Они должны иметь большую поверхность мембран в единице объема аппарата и быть простыми в сборке и монтаже ввиду необходимости периодической смены мембранны. Должно присутствовать равномерное движение жидкости по секциям и элементам аппарата над мембранный поверхностью и при этом иметь достаточно высокую скорость течения для уменьшения влияния концентрационной поляризации. Так же не должно возникать перепада давления в аппарате.

Перераспределение и концентрирование растворенных в воде примесей осуществляется электродиализом. В отличие от баромембранных процессов, когда через мембранны проходят молекулы воды, а для примесей мембрана является практически непроницаемой, в электромембранных процессах мембрана должна быть непроницаема для молекул воды. Сущность электродиализа заключается в удалении из растворов ионизированных веществ путем переноса их через мембранны в поле постоянного электрического тока. В такой системе

возникает направленное движение ионов растворенных солей, а также ионов  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$ , причем катионы движутся к катоду, а анионы – к аноду. При достижении катода катионы восстанавливаются в соответствии с катодными реакциями:



На аноде происходит окисление анионов:



Одной из основ умягчения воды электродиализом является способность набухших ионообменных мембран пропускать ионы только одного знака заряда. Данная способность выражается высокой концентрацией неподвижных (фиксированных) ионов, химически связанных с каркасом, или матрицей мембранны. Заряд фиксированных ионов нейтрализуется эквивалентным количеством ионов противоположного знака заряда (противоионов). Между фиксированными ионами и противоионами существует ионная связь. Поэтому в набухшей мемbrane пары фиксированный ион – противоион диссоциирована. Так как концентрация фиксированных ионов велика, то при равновесии с разбавленными водными растворами ионы, одноименные с фиксированными (коионами), проникают в мембрану в очень незначительном количестве. В связи с этим практически единственными переносчиками тока в ионообменных мембранах являются противоионы [8].

Ток, проходящий через раствор, устанавливается в зависимости от природы растворенных веществ, их концентрации, напряжения. Плотность тока в растворе не должна превышать некоторого определенного значения – предельной плотности тока, выше которой начинается интенсивный перенос через раствор ионов  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$ , а интенсивность переноса других ионов стабилизируется [9]. Чем больше плотность тока, тем выше будет производительность электродиализной установки, тем значительнее будут затраты электроэнергии на получение 1 м<sup>3</sup> обессоленной воды.

Эффективность процесса электродиализа во многом зависит от свойств ионообменных мембран. Качество мембран характеризуется их толщиной, склонностью к набуханию, механической прочностью, селективностью, удельным электрическим сопротивлением и т. д. Обычно селективность мембраны, т.е. способность ее пропускать ионы и проводить электрический ток, определяют по переносу ионов  $\text{Na}^+$  или  $\text{Cl}^-$ . Чем выше число переноса, тем более селективна мембрана. К наиболее качественным относят мембранны, имеющие: малое электрическое сопротивление; слабую склонность к набуханию; небольшую толщину, чтобы сопротивление электрическому току было невелико, но достаточной для обеспечения прочности мембранны к механическим нагрузкам.

Область применения электродиализа ограни-

чивается солесодержанием 0,5…10 г/л, так как при меньших концентрациях падает проводимость раствора и уменьшается эффективность использования электроэнергии, а при больших – процесс становится невыгоден вследствие существенного роста энергозатрат, так как затраченная электроэнергия пропорциональна количеству удаляемых ионов.

В силу своих плюсов возможности создания безреагентной системы водоподготовки, мембранные технологии умягчения имеют ряд минусов: необходимость тщательной предподготовки воды для обеспечения большой производительности мембран и длительного срока их службы; большой объем сбрасываемого концентрата (с учетом компоновочных решений расход фильтрата может составить 75–80% исходной воды, концентрат – 20–25%); значительный расход исходной воды; большие капитальные затраты; непрерывность режима работы установок.

Изменения свойств воды, наблюдаемые в результате ее прохождения через узкий зазор между полюсами постоянного магнита (или электромагнита), позволяют рассматривать омагничивание воды как способ ее обработки. В последние десятилетия, как в России, так и зарубежном для борьбы с образованием накипи применяют магнитную обработку. Исследованиями многих авторов, а также промышленной практикой доказано, что магнитное поле оказывает влияние на кинетические процессы кристаллизации накипеобразователей. Магнитная обработка воды заключается в воздействии магнитных полей на поток воды. При прохождении воды в межполюсном пространстве магнитного аппарата при наличии ферромагнетиков в пересыщенном по накипеобразователю растворе (воде) образуются зародыши центров кристаллизации, которые начинают расти, вызывая объемную кристаллизацию солей жидкости. В результате вместо накипи образуется тонкодисперсная взвесь, частицы которой, достигнув определенного размера, образуют шлам [10].

Установлено, что при использование магнитного поля на нестабильную по карбонату кальцию воду, содержащую ферромагнитные примеси ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\delta\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), происходит снижение образования отложений на теплопередающих поверхностях. Это явление объясняется коагуляцией ферромагнетиков в магнитном поле за счет процессов ориентации. Скоагулированные ферримагнитные коллоидные частицы намагничиваются и агрегируют, при этом приобретая функции центров кристаллизации на которых происходит кристаллизация  $\text{CaCO}_3$ . В отсутствие пресыщения агрегаты ферромагнетиков, образованные при воздействии магнитного поля, недолговечны и распадаются через 5–6 секунд на выходе из магнитного поля. Следовательно присутствие в обрабатываемой воде ферромагнетиков в определенной концентрации при ее магнитной обработке

является одним из условий для получения положительного эффекта.

Противонакипный эффект магнитной обработки обусловлен появлением в воде, прошедшей магнитное поле, многочисленных субмикроскопических и коллоидных образований, которые могут служить зародышевыми кристаллами карбоната кальция, выделяющегося при нагревании воды. Присутствие в жидкости огромного количества таких центров кристаллизации приводит к выделению карбоната кальция в объеме жидкости, а также вызывает замедление роста кристаллов, что обуславливает их высокую дисперсность. Перенесение кристаллизации основного накипеобразователя в толщу нагреваемой воды способствует предотвращению отложений на теплопередающих поверхностях оборудования.

Механизм воздействия магнитного поля на воду и содержащиеся в ней примеси окончательно не выяснен, но имеется ряд гипотез[11]:

- первая, объясняет действие магнитного поля его влиянием на ионы солей, присутствующих в воде (под влиянием магнитного поля происходит поляризация и деформация ионов, сопровождающиеся уменьшением их гидратации, что повышает вероятность их сближения и в конечном итоге образование центров кристаллизации);

- вторая предполагает действие магнитного поля на примеси воды, находящиеся в коллоидном состоянии;

- третья группа объединяет представления о возможном влиянии магнитного поля на структуру воды (это влияние, с одной стороны, может вызвать изменения в агрегации молекул воды, а с другой – нарушить ориентацию ядерных спинов водорода в молекулах  $H_2O$ ).

При наложении магнитного поля в массе воды формируются центры кристаллизации, вследствие чего выделение нерастворимых солей жесткости происходит не на теплопередающей поверхности (нагрева или охлаждения), а в объеме воды. Таким образом, вместо твердой накипи в воде появляется мигрирующий тонкодисперсный шлам, удаляемый с поверхности теплообменников и трубопро-

водов. Однако выделившийся шлам не обеспечивает полноту эффекта соответствующего метода обработки воды, так как при недостаточном удалении образовавшегося шлама может образовываться вторичная малотеплопроводная накипь. Поэтому при магнитной обработке воды необходимо в системе наличие устройств, обеспечивающих надежный и своевременный отвод образующегося шлама [12, 13].

Нами были проведены лабораторные исследования по изучению эффективности защиты водогрейного оборудования от накипи при обработке воды электромагнитным полем. Обработка воды электромагнитным полем осуществлялась путем пропускания ее через межполюсное пространство электромагнита перпендикулярно магнитным силовым линиям. Сначала проводились исследования по изучению влияния обработки воды электромагнитным полем в замкнутом режиме работы установки, т.е. система была закрытой. Изучалось влияние обработки воды электромагнитным полем на накипеобразование при различных значениях напряженности магнитного поля. Условия по проведению этих экспериментов представлены в табл. 1.

Полученные экспериментальные данные представлены в табл. 2. На основании полученных данных были построены кривые отложения накипи на нагревательном элементе при обработке воды электромагнитным полем при различной напряженности магнитного поля. Эти кривые показаны на рис. 1.

Затем по формуле (1) была определена эффективность защиты от накипи нагревательного элемента при обработке воды электромагнитным полем.

$$E = \frac{m_h - m_0}{m_h} \cdot 100\% \quad (1)$$

где  $m_h$  – масса накипи, отложившейся на нагревательном элементе в воде, не обработанной электромагнитным полем;  $m_0$  - масса накипи, отложившейся на нагревательном элементе в воде, обработанной электромагнитным полем.

Таблица 1. Условия по проведению экспериментов по изучению влияния напряженности магнитного поля на эффективность противонакипной обработки воды в замкнутом режиме работы установки

Table 1. Conditions for experiments on the influence of magnetic field on the efficiency of antiscal water treatment installation in closed mode

№ п/п	Наименование	Единицы изме- рения	Номер опыта		
			1	2	3
1	Скорость воды в нагревательной ячейке	м/с	0,3	0,3	0,3
2	Жесткость воды	ммоль/л	5,4	5,4	5,4
3	Щелочность воды	ммоль/л	6	6	6
4	Содержание $Ca^{2+}$	ммоль/л	3,6	3,6	3,6
5	Содержание $Mg^{2+}$	ммоль/л	1,8	1,8	1,8
6	Напряженность магнитного поля	A/m	$11 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$

Таблица 2. Динамика отложений накипи ( $\text{кг} \cdot 10^{-3}$ ) на нагревательном элементе при обработке воды электромагнитным полем в замкнутом режиме работы лабораторной установки при различной напряженности магнитного поля

Table 2. Dynamics of scale deposits ( $\text{kg} \cdot 10^{-3}$ ) on the heating element in water treatment in a confined electromagnetic field laboratory setup operation at different magnetic field intensity

Время работы установки, ч	Без обработки	Напряженность магнитного поля, А/м		
		$11 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
1	0,064	0,056	0,060	0,059
2	0,204	0,093	0,125	0,125
3	0,331	0,113	0,144	0,143
4	0,378	0,121	0,157	0,163
5	0,408	0,126	0,165	0,171
6	0,410	0,130	0,174	0,174
7	0,418	0,133	0,182	0,179

Таблица 3. Эффективность защиты от накипи нагревательного элемента (%) масс.) при обработке воды электромагнитным полем в замкнутом режиме работы лабораторной установки при различной напряженности магнитного поля

Table 3. Protection against scale heating element (wt.%) In water treatment in a confined electromagnetic field laboratory setup operation at different magnetic field intensity

Напряженность магнитного поля, А/м	Эффективность защиты от накипи, %
$5 \cdot 10^4$	58,1
$8 \cdot 10^4$	59,5
$11 \cdot 10^4$	69,1

Полученные результаты представлены в табл. 3.

Из табл. 2, 3 и рис. 1 видно, что наименьшее количество накипи на нагревательном элементе и наибольшая эффективность защиты нагревательного элемента достигаются при обработке воды электромагнитным полем напряженностью  $11 \cdot 10^4 \text{ A/m}$ .

Затем были проведены исследования по изучению влияния обработки воды электромагнитным полем в открытой системе. Количество подпиточной воды составляло 20 %. Обработка воды электромагнитным полем осуществлялось при напряженности магнитного поля равной  $11 \cdot 10^4 \text{ A/m}$ . Остальные условия проведения экспериментов такие же, как и условия, представленные в

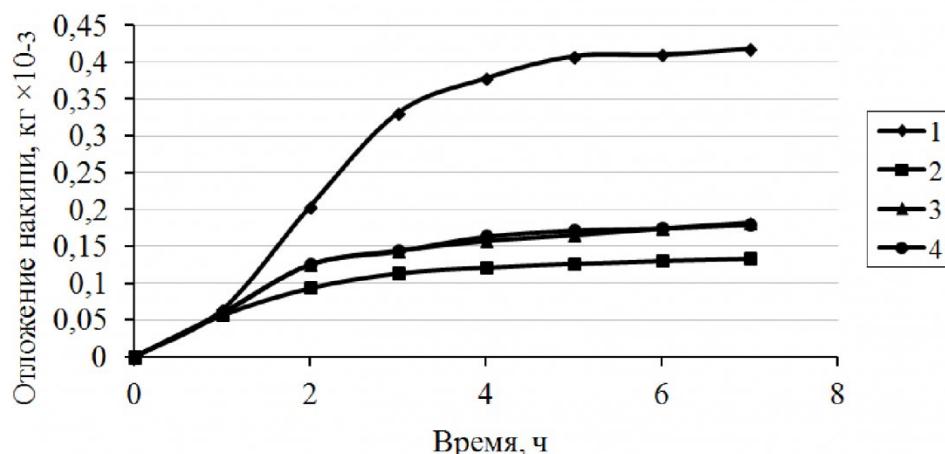


Рис. 1. Отложение накипи на нагревательном элементе при обработке воды электромагнитным полем: 1 – без обработки; 2, 3, 4 – с обработкой электромагнитным полем при напряженностях соответственно  $11 \cdot 10^4$ ,  $8 \cdot 10^4$ ,  $5 \cdot 10^4 \text{ A/m}$ .

Fig. 1. The deposition of scale on the heating element in water treatment electro-magnetic field: 1 - without treatment; 2, 3, 4 - to the processing of the electromagnetic field at intensities respectively  $11 \cdot 10^4$ ,  $8 \cdot 10^4$ ,  $5 \cdot 10^4 \text{ A/m}$ .

Таблица 4. Эффективность защиты от накипи при обработке воды электромагнитным полем в открытой системе при напряженности магнитного поля  $11 \cdot 10^4 \text{ A/m}$

Table 4. The effectiveness of the scale in water treatment electromagnetic field in an open system at the strength of the magnetic field  $11 \cdot 10^4 \text{ A/m}$

Способ обработки воды электромагнитным полем	Эффективность защиты, % масс.
Обработка воды электромагнитным полем в замкнутом цикле	69,1
Обработка воды электромагнитным полем в открытой системе	53,0

табл. 1.

По полученным экспериментальным данным был определен противонакипный эффект обработки воды электромагнитным полем при данных условиях. Полученные результаты представлены в табл. 4.

Из анализа результатов, представленных в табл. 3 и табл. 4, можно сделать следующие выводы: 1) с увеличение напряженности магнитного поля возрастает эффективность защиты водогрейного оборудования от накипи; 2) эффективность антинакипной защиты водогрейного оборудования при обработке воды электромагнитным полем в открытых системах меньше, чем в замкнутых циклах.

Промышленные опыты в свое время показали, что использование магнитной обработки воды позволяет понизить накипеобразование примерно на 30-50 %. В указанных пределах положительный эффект возрастает в случае обработки пресных вод с преобладающей кальциевой карбонатной жесткостью. При магнитной обработке воды нередко наблюдается заметное разрыхление структуры остаточных отложений.

Кроме того, при магнитной обработке воды коррозионная активность воды не снижается. Поэтому, при наличии очищающего эффекта интенсивность коррозии возрастает, появляются условия для развития подшламовой коррозии. Все это требует создания мер, гарантирующих отсутствие интенсивной коррозии металла [14, 15].

Зачастую на практике эффект от магнитного поля проявляется только в первый период эксплуатации, затем результат пропадает, так как свои свойства омагниченная вода сохраняет меньше

суток. Это явление потери магнитных свойств называется релаксацией. Именно поэтому в системах, где вода находится в течение многих часов и дней (оборотные системы водоснабжения, циркуляционные контуры котлов и систем отопления и др.), необходимо предусматривать рециркуляционные системы, куда направлять не менее 10% находящейся в системе воды, и постоянно эту часть воды подмагничивать. Для избежания осаждения накипеобразующих частиц на поверхности теплотехнического оборудования, необходимо турбулизировать поток воды. Это значит, что скорость воды около нагретой стенки трубы не должна быть меньше 1 м/с. В то же время длина пути, на протяжении которого осуществляется воздействие магнита на воду, должна быть достаточной.

В связи с вышеуказанным, магнитная обработка воды рекомендовалась для природных вод с общей жесткостью до 10 мг-экв/л и карбонатной не выше 6 мг-экв/л. Кроме того, устанавливались ограничения по величине удельного водяного объема котла – не более 50 л/м<sup>2</sup> поверхности нагрева, а также и по тепловому напряжению поверхности нагрева – не более 100 кВт/м<sup>2</sup> (86 Мкал/м<sup>2</sup>×ч) [16].

Водоподготовка для тепловых сетей на предприятиях тепловой энергетики осуществляется разными методами. Все эти методы водоподготовки различаются между собой по степени эффективности защиты теплофикационного оборудования от накипи. Таким образом, выбор определенного метода для устранения из воды солей кальция и магния, зависит от изначального качества воды и необходимого уровня умягчения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ларин, Б. М. Совершенствование водоподготовки на ТЭС / Б. М. Ларин, Е. Н. Бушуев, А. Б. Ларин, Е. А. Карпычев, А. В. Жадан // Теплоэнергетика. – 2015. – № 4. – С. 58–64.
- 2 Клячко, В. А. Очистка природных вод / В. А. Клячко, И. З. Апельцин. – М.: Стройиздат, 1971. – 574 с.
3. Кострикин, Ю. М. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления: Справочник / Ю. М. Кострикин, Н. А. Мещерский, О. В. Коровина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 254 с.
4. Стерман, Л. С. Химические и термические методы обработки воды на ТЭС / Л. С. Стерман, В. Н. Покровский. – М.: Энергия, 1981. – 231 с.
5. Гребенюк, В. Д. Обессоливание воды ионитами / В. Д. Гребенюк, А. А. Мазо. – М.: Химия, 1980. – 256 с.

6. Высоцкий, С. П. Мембранные и ионитные технологии водоподготовки в энергетике. – К.: Техніка, 1989. – 176 с.
7. Дытнерский, Ю. И. Обратный осмос и ультрафильтрация. – М.: Химия, 1978. – 352 с.
8. Дытнерский, Ю. Н. Мембранные процессы разделения жидких смесей. – М.: Химия, 1975. – 232 с.
9. Смагин, В. Н. Подготовка воды для парогенераторов методом электродиализа и ионного обмена / В. Н. Смагин, П. Д. Щекотов // Теплоэнергетика. – 1973. – № 5. – С. 17–20.
10. Рунов, Д. М. Повышение эффективности теплообменных аппаратов путем рационального выбора диапазона частот электромагнитной обработки воды / Д. М. Рунов, А. Г. Лаптев // Теплоэнергетика. – 2015. – № 5. – С. 67–70.
11. Классен, В. И. Омагничивание водных систем. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1982. – 296 с.
12. Burger Andreas. Physikalische Wasserbehandlung gegen kalk und Rost //Entsorg. Prax. – 1995. – № 3. – p. 57–58.
13. Leroy P. Le traitement des eaux à l'aide des appareils antitartrare électroniques //Techn.Sci.Eth. – 1987. – № 6. – p. 253–260.
14. Goldsfein H. L'effacement magnétique de l'eau //Frib. Gebedeau. – 1982. – № 460. – p. 105–108.
15. Guathier M. L'antartrage et l'antitartrare électronique //L'Eau, L'Industrie, Les Nuisances. – 1986. – № 10. – p. 28–30.
16. Кошоридзе, С. И. Механизм снижения накипи при магнитной обработке воды в теплоэнергетических устройствах / С. И. Кошоридзе, Ю. К. Левин // Теплоэнергетика. – 2013. – № 3. – С. 74–77.

## REFERENCES

1. Larin, B. M. Improvement of water treatment on the TPP / B. M. Larin, E. N. Bushuyev, A. B. Larin, E. A. Karpychev, A. V. Zhadan // Thermal Engineering. - 2015. - № 4. - S. 58-64. (rus)
2. Klyachko, V. A. Clean natural water / V. A. Klyachko, I. Z. Apeltsin. - M.: Stroyizdat, 1971. - 574 p. (rus)
3. Kostrikin, Y. M. Water treatment and water regime of power low and medium pressure: Guide / Y. M. Kostrikin, N. A. Meshchersky, O. V. Korovin. - M.: Energoatomisdat, 1990. - 254 p. (rus)
4. Sterman, L. S. Chemical and thermal water treatment methods on the TPP / L. S. Sterman, V. N. Pokrovsky. - M.: Energia, 1981. - 231 p.
5. Grebenyuk and V. D. Water desalination ion exchangers / V. D. Grebenyuk, A. Mazo. - M.: Chemistry, 1980. - 256 p. (rus)
6. Vysotsky, S. P. Ion-exchange membrane and water treatment technology in the energy-power industry. – К.: Tehnika, 1989. - 176 p. (rus)
7. Dytnersky, Y. I. Reverse osmosis and ultrafiltration. - M.: Chemistry, 1978. - 352 p. (rus)
8. Dytnersky, N. Membrane separation processes of liquid mixtures. - M.: Chemistry, 1975. - 232 p. (rus)
9. Smagin V. N. Preparation of water for steam generators by electrodialysis and ion exchange / V. N. Smagin, P. D. Shchekotov // Thermal Engineering. - 1973. - № 5. - S. 17–20.
10. Rounov, D. M. Improving the efficiency of heat exchangers by means of a rational choice of the frequency range of the electromagnetic water treatment / D. M. Rounov, A. G. Laptev // Thermal Engineering. - 2015. - № 5. - S. 67–70. (rus)
11. Klassen, V. I. Magnetization of water systems. - 2 nd ed., Revised. and ext. - M : Chemistry, 1982. - 296 p. (rus)
12. Burger Andreas. Physikalische Wasserbehandlung gegen kalk und Rost //Entsorg. Prax. – 1995. – № 3. – p. 57–58.
13. Leroy P. Le traitement des eaux à l'aide des appareils antitartrare électroniques //Techn.Sci.Eth. – 1987. – № 6. – p. 253–260.
14. Goldsfein H. L'effacement magnétique de l'eau //Frib. Gebedeau. – 1982. – № 460. – p. 105–108.
15. Guathier M. L'antartrage et l'antitartrare électronique //L'Eau, L'Industrie, Les Nuisances. – 1986. – № 10. – p. 28–30.
16. Koshoridze, S. I. Mechanism reducing scale with magnetic water treatment in thermal power units / S. I. Koshoridze, Y. K. Lewin // Thermal Engineering. - 2013. - № 3. - S. 74–77. (rus)

Поступило в редакцию 20.04.2016

Received 20 April 2016