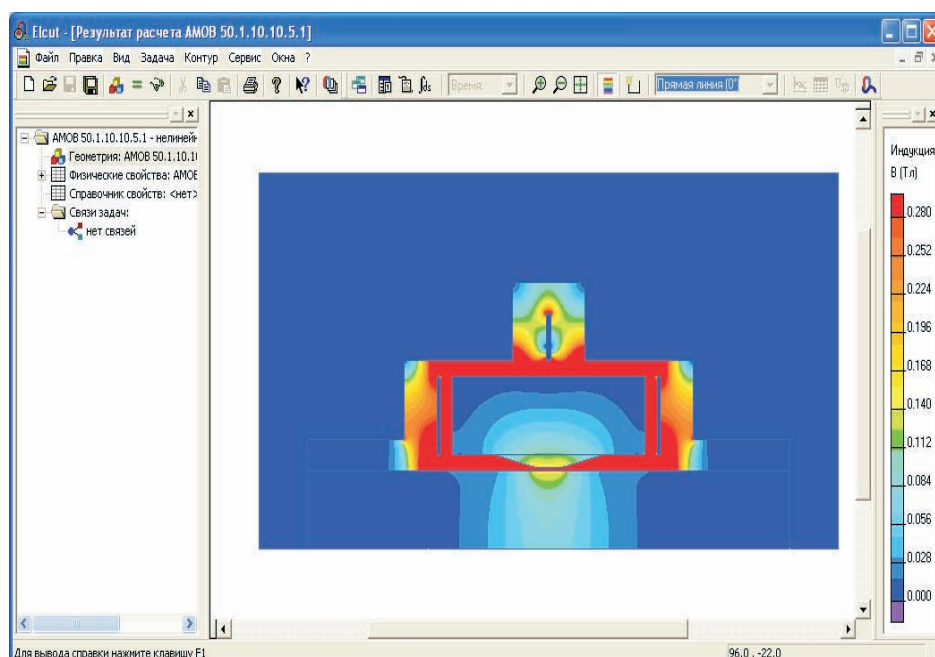


С. Н. Антонов  
А. И. Адошев  
И. К. Шарипов  
В. Н. Шемякин

# Аппараты магнитной обработки воды. Проектирование, моделирование и исследование

Монография



**С. Н. Антонов  
А. И. Адошев  
И. К. Шарипов  
В. Н. Шемякин**

**АППАРАТЫ МАГНИТНОЙ  
ОБРАБОТКИ ВОДЫ.  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ  
И ИССЛЕДОВАНИЕ**

**Монография**

Ставрополь  
«АГРУС»  
2014

УДК 621.318.38  
ББК 31.2  
А72

***Рецензенты:***

доктор технических наук, профессор кафедры физики  
ФГБОУ ВПО АЧГАА  
*Н. В. Ксенз;*

доктор технических наук, профессор кафедры  
«Электроснабжение и эксплуатация электрооборудования»  
ФГБОУ ВПО СтГАУ  
*В. Я. Хорольский;*

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры  
«Теоретические основы электротехники»  
ФГБОУ ВПО СтГАУ  
*А. Ф. Шаталов*

**Антонов, С. Н.**

А72      Аппараты магнитной обработки воды. Проектирование, моделирование и исследование : монография / С. Н. Антонов, А. И. Адошев, И. К. Шарипов, В. Н. Шемякин. – Ставрополь : АГРУС Ставропольского гос. аграрного ун-та, 2014. – 220 с.

ISBN 978-5-9596-0969-6

В монографии изложены положения по проектированию, моделированию и исследованию аппаратов магнитной обработки воды. Рассмотрены способы водоподготовки в котельных, конструкции аппаратов. Приведены методы расчета магнитных полей. Представлена оптимизация конструктивных параметров аппарата с моделированием в программном комплексе ElCut. Проведены исследования эффективности обработки аппаратом магнитной обработки воды.

Для инженерно-технических работников, магистров агроинженерных специальностей.

УДК 621.318.38  
ББК 31.2

ISBN 978-5-9596-0969-6

© ФГБОУ ВПО Ставропольский государственный аграрный университет, 2014

## ВВЕДЕНИЕ

Появление накипи на поверхностях теплоэнергетического оборудования обусловлено содержанием в воде минеральных солей магния и кальция. Этот аспект является наиболее актуальной проблемой в теплоэнергетике, промышленности и жилищно-коммунальном комплексе. Необходимо отметить, что слой накипи толщиной 1 мм приводит к перерасходу топлива на нагрев теплоносителя от 5 до 10 %. При эксплуатации системы теплоснабжения в течение длительного промежутка времени из-за образования накипи, общие потери энергии могут достигать 60 %. Учитывая Федеральный закон №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», необходимо проводить мероприятия по ежегодной экономии энергетических ресурсов. Устранить проблему образования накипи, тем самым увеличить эффективность энергоустановки, возможно двумя методами: химическим (реагентным) и физическим (безреагентным).

В основе химического метода лежит принцип ионного обмена. Недостаток метода – изменение химического состава воды.

Из всех физических методов наибольшее распространение получил магнитный метод обработки.

Процесс магнитной обработки водных систем до настоящего времени считается изученным не до конца и, соответственно, вопрос снижения накипеобразования с использованием магнитной водоподготовки не решен окончательно. В связи с вышесказанным, появляются новые теории процесса воздействия магнитного поля на воду, новые конструкции аппаратов магнитной обработки, способы определения эффективности воздействия на воду.

Учитывая вышесказанное, при принятии решения о возможном применении той или иной технологической схемы водоподготовки, необходимо решить ряд задач. Эти задачи, часто носят научно-исследовательский характер. Связано это, прежде всего, с подбором электромагнитных характеристик аппаратов эффективно воздействующих на воду. Свойства воды, как в течение года, так и в разрезе нескольких лет, не остаются постоянными, а изменяются циклично с возможными отклонениями как природные явления в целом.

Предлагаемая монография рассматривает такие вопросы как: способы и технологические схемы водоподготовки; существующие аппараты магнитной обработки воды; методы расчета магнитных полей аппаратов; разработка, моделирование и оптимизация параметров аппарата магнитной обработки; проведение экспериментальных исследований аппаратов.

# 1 ВОДОПОДГОТОВКА В КОТЕЛЬНЫХ

## СПОСОБЫ ВОДОПОДГОТОВКИ В КОТЕЛЬНЫХ

Источниками водоснабжения отопительных котельных могут служить поверхностные воды озер, рек и искусственных водохранилищ, а также подземные воды из артезианских скважин. Поверхностные воды всегда содержат растворенные вещества и нерастворенные механические примеси. Подземные воды обычно бывают прозрачными и практически не содержащими механических примесей. Соле содержание подземных вод, как правило, выше, чем поверхностных. Наибольшее значение для водоснабжения котельных установок имеют поверхностные воды рек и озер. Расход и качество речной воды изменяется циклично не только по времени года, но и в многолетнем разрезе. В зависимости от характера использования воды различными потребителями определяются и показатели, необходимые для качественной и количественной характеристики воды. Одним из показателей воды для использования ее в водогрейном оборудовании является жесткость.

Общей жесткостью воды  $J_0$  называется суммарная концентрация ионов кальция и магния, выражаемая в мг-экв/кг, а при малых значениях – в мкг-экв/кг. По определяющему катиониту общая жесткость воды подразделяется на кальциевую  $J_{Ca}$  и магниевую  $J_{Mg}$  [93]. Часть общей жесткости, эквивалентная концентрации бикарбонат-ионов в воде, называется карбонатной жесткостью  $J_k$ , а остальная часть, эквивалентная содержащимся в воде другим анионам ( $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , и др.), называется некарбонатной жесткостью  $J_{нк}$ .

По значению общей жесткости (мг-экв/кг) природные воды классифицируются следующим образом:  $J_0 < 1,5$  – воды с малой жесткостью;  $J_0 = 1,5-3,0$  – воды со средней жесткостью;  $J_0 = 3-6$  – воды с повышенной жесткостью;  $J_0 = 6-12$  – воды с высокой жесткостью;  $J_0 > 12$  – воды с очень высокой жесткостью.

Возможность применения магнитной обработки, место установки аппарата и достигаемый эффект зависит от качества исходной воды. К качеству воды, подлежащей обработке, предъявляются определенные требования, вода не должна содержать механических примесей больше установленных норм и агрессивную двуокись углерода. Присутствие в воде агрессивной двуокиси углерода снижает противонакипный эффект пропорционально ее концентрации из-за снижения пересыщения. При концентрации агрессивной двуокиси углерода 10-15 мг/кг, противонакипный эффект снижается на несколько процентов, а при концентрации 30 мг/кг уменьшается не менее чем вдвое. Наибольшее снижение эффекта происходит при проточной системе движения воды (котлы, теплообменники).

В циркуляционных системах охлаждения при многократном контакте воды с магнитным полем присутствие агрессивной двуокиси углерода заметного влияния на эффект омагничивания не оказывает.

Вопрос о необходимости предварительной декарбонизации решается конкретно для каждой установки. Если в ходе производственного процесса происходит снижение концентрации двуокиси углерода, то магнитный аппарат устанавливают в том месте, где агрессивная двуокись углерода отсутствует или количество ее минимально.

Снижение общего количества двуокиси углерода, в том числе и агрессивной, может быть достигнуто продуванием через воду воздуха или ее подогревом до температуры 40-50 °С. В тех же случаях, когда такую обработку провести не представляется возможным, изменение концентрации двуокиси углерода может происходить при нагревании воды в замкнутой системе.

Обязательным условием при обработке воды является карбонатная жесткость. При значениях до 1,5 мг-экв/л применение магнитного поля малоэффективно и не целесообразно. Снижение противонакипного эффекта наблюдается в весенний период, когда поверхностные воды разбавлены талой водой. В летний период эффект улучшается и достигает максимума в зимнее время – в период наибольшей концентрации солей, что связано с состоянием системы, близкой к пересыщению.

Для промышленных котлов с рабочим давлением до 15 атм. при докотловой обработке, общая жесткость питательной воды не должна превышать 0,7 мг-экв/л. При внутрикотловой обработке общая жесткость питательной воды не должна превышать 5 мг-экв/л.

Многообразие примесей в природной воде служит причиной того, что очистка добавочной воды, для подпитки котлов на водоподготовительной установке организуется в несколько этапов, согласно [112]. На первом этапе методом осаждения из воды выделяются грубодисперсные вещества. Окончательная очистка от осадка осуществляется при помощи процесса фильтрования:

- через однослойные механические фильтры с загрузкой антрацита крупностью 0,5 - 1,2 мм для вод с содержанием взвешенных веществ до 50 мг/кг;
- через двухслойные механические фильтры с загрузкой кварцевого песка крупностью 0,5 - 1,2 мм и антрацита крупностью 0,8 - 1,8 мм для вод с содержанием взвешенных веществ до 100 мг/кг.

Если очистка воды от грубодисперсных примесей, имеющих заметный гравитационный эффект, может быть осуществлена обычным отстаиванием, то выделение коллоидно-дисперсных веществ из воды требует применения процесса коагуляции. Под коагуляцией понимают физико-

химический процесс слипания коллоидных частиц и образование грубодисперсной фазы с последующим ее выделением из воды.

Для улучшения работы ионообменной части водоподготовительных устройств, применяется известкование воды. В настоящее время основное назначение известкования - снижение бикарбонатной щелочности воды. Одновременно с этим уменьшаются жесткость, солесодержание, концентрация грубодисперсных примесей.

Вода, прошедшая предочистку, практически не содержит в себе грубодисперсных примесей и, в значительной степени, освобождена от коллоидных. Однако, основная часть примесей в растворенном состоянии остается в воде и должна быть удалена из нее. В настоящее время для этого применяют ионный обмен. Сущность ионного обмена заключается в использовании способности некоторых специальных материалов (ионитов) изменять в желаемом направлении ионный состав примесей воды.

В технологии водоподготовки для удаления ионов из воды, применяют два процесса [133]: катионирование - удаление катионов и анионирование - удаление анионов. Процессы ионирования осуществляют в различных аппаратах, но наибольшее распространение получили насыпные ионитные фильтры.

*Na-катионирование* – это процесс применяется для умягчения воды и имеет самостоятельное значение при подготовке воды с малой щелочностью для котлов низкого давления и подпитки теплосетей. Воду пропускают через слой катионита. При этом процессе происходит удаление из воды ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в обмен на эквивалентное количество ионов  $\text{Na}^+$ .

*H-катионирование* – это процесс удаления всех катионов из воды с заменой их на ионы водорода. Оно применяется в схемах совместно с другими процессами ионирования для подготовки воды из артезианских или поверхностных вод при необходимости снижения относительной щелочности.

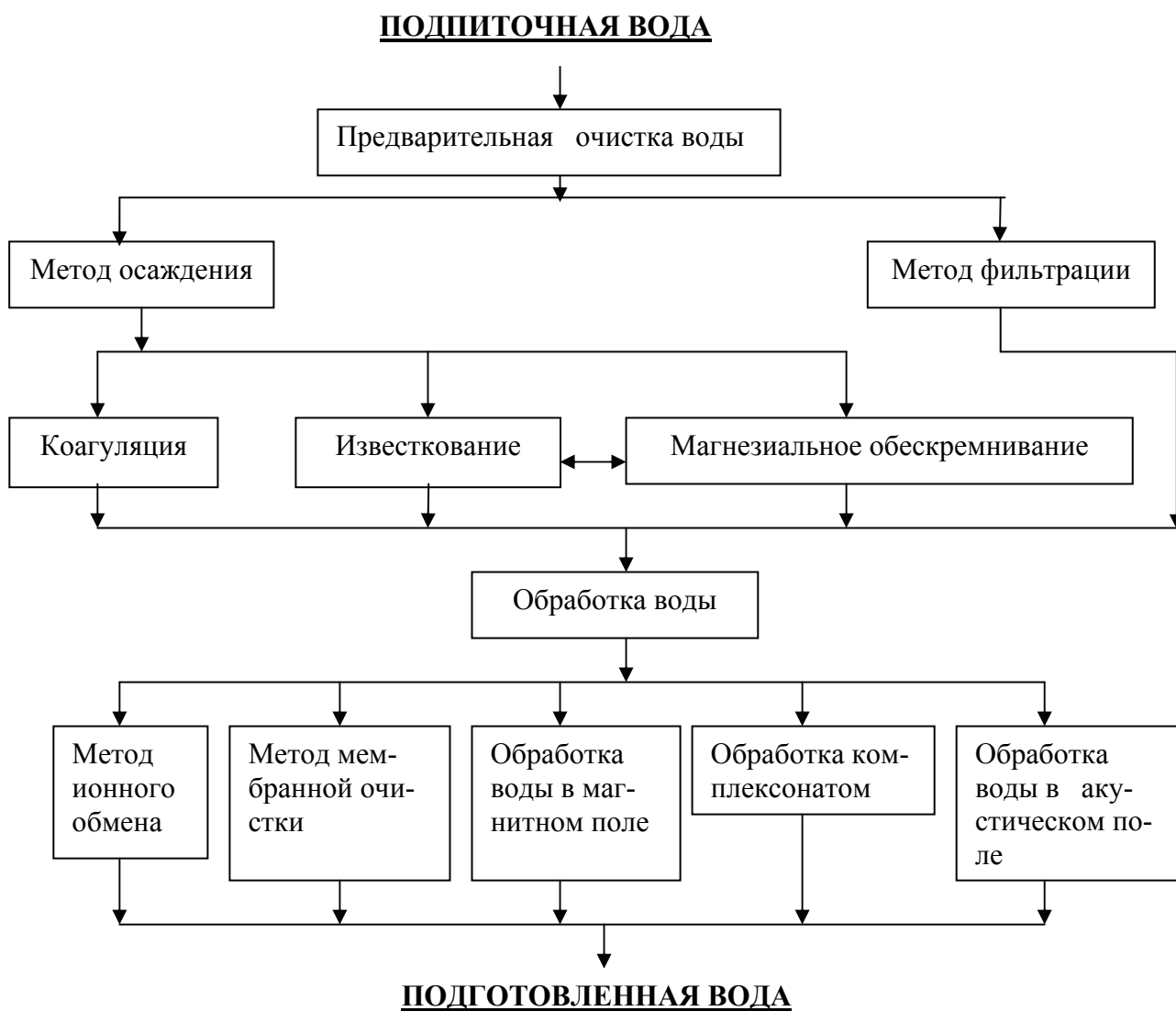
В последнее время получил распространение метод подготовки воды комплексонатами. Для обработки воды применяется ингибитор коррозии ОЭДФ-Zn. Его применение позволяет получить следующие результаты:

- защитить сталь от коррозии;
- постепенно отмыть существующие отложения;
- предотвратить образование новых накипей.

Данная технология получила распространение в Ростовской области и Ставропольском крае.

В настоящее время наиболее перспективным является обработка воды в магнитном поле. Магнитный метод водоподготовки основан на явлении того, что вода после воздействия на нее магнитного поля при последующем ее нагреве в котле не дает накипных отложений на поверхности

нагрева. Некоторые соединения кристаллизуются на поверхности нагрева, образуя накипь. Центрами накипеобразования являются шероховатости поверхности нагрева [135]. В результате магнитной обработки соли жесткости выпадают в виде шлама и должны непрерывно удаляться из нижних точек котла.



**Рисунок 1.2 – Классификация способов водоподготовки**

На рисунке 1.2 представлена классификация способов водоподготовки.

На рисунках 1.3, 1.4, 1.5 представлены гистограммы, которые позволяют оценить степень накипеобразования, коррозии и стоимости подготовки 1 м<sup>3</sup> воды.



## 1.2 ПРОЦЕСС ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВОДУ

Накопленные научные знания не дают однозначного ответа на вопрос о влиянии магнитного поля на физико-химические процессы, происходящие в водных растворах. Однако, можно считать установленным, что магнитное поле оказывает определенное влияние на кинетику кристаллизации, вызывая увеличение концентрации центров кристаллизации в массе воды, вследствие чего вместо накипи образуется взвесь (шлам).

Процессы, протекающие в воде при наложении магнитного поля, можно представить следующим образом, при прохождении воды через зону обработки магнитным полем и наличии ферромагнетиков в пересыщенном по накипеобразователю растворе (воде), образуются зародыши центров кристаллизации.

Тебенихин Е.Ф. совместно с Кишневым В.А. провели детальное исследование механизма образования центров кристаллизации в присутствии окислов железа [135]. Эти окислы под воздействием магнитного поля в зоне обработки аппарата укрупняются до размера больше критического для данного пересыщения и адсорбируют избыток кристаллизующегося вещества (накипеобразователя), превращаясь в затравку. Понятием критический характеризуется размер частиц (около 0,5 мкм), выполняющих роль центров кристаллизации.

Центром кристаллизации может быть частица той же природы, что и накипеобразователь, любая другая изоморфная с последним частица.

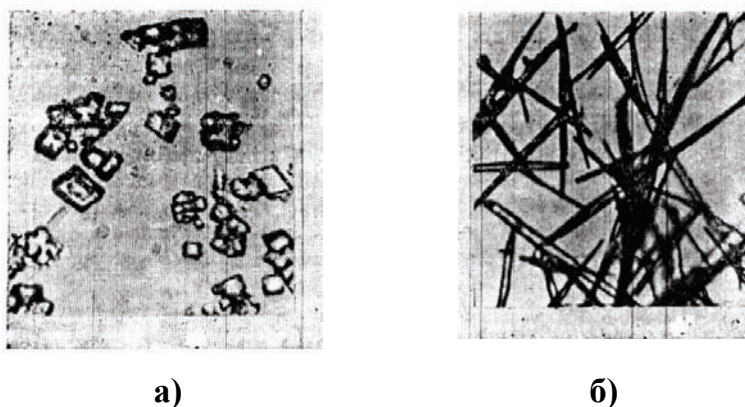
Кристаллизация происходит значительно быстрее и легче, если в растворе уже существует твердая поверхность. По данным Р.Ф. Стринклер-Констэбл, выделение твердой фазы на готовой поверхности протекает значительно легче, так как энергия, необходимая для этого, меньше, чем для возникновения зародыша в объеме раствора. Поверхностью, на которой происходит кристаллизация, может служить не только кристалл данного вещества, но и любой другой предмет, на котором возможна адсорбция ионов или молекул, находящихся в растворе. Механизм процесса, в этом случае, может быть представлен следующим образом. Частицы вещества адсорбируют на своей поверхности молекулы или ионы кристаллизующегося вещества, в результате чего образуется адсорбционный слой. Этот слой постепенно уплотняется и превращается в слой кристаллического вещества. Дальнейший рост происходит за счет растворенного вещества, кристаллизующегося на поверхности частицы. Центром кристаллизации может служить частица размером несколько больше критического для данного пересыщения, состоящая из кристаллизующегося вещества, изоморфного ему, или любое другое образование, способное адсорбировать выделяющееся вещество. Частицы, выполняющие роль цен-

тров кристаллизации, обладают значительной суммарной поверхностью и ускоряют объемную кристаллизацию.

Примером влияния готовой поверхности на кристаллизацию может служить тот факт, что зародыши кристаллизации обычно образуются на поверхности нагрева или охлаждения теплоагрегата, так как энергия, затрачиваемая на образование кристаллов около твердой стенки, будет значительно меньше энергии, необходимой для выделения в объеме воды. При этом, на образование зародыша и кристаллизацию будут влиять также электрическое взаимодействие и характер поверхности (наличие шероховатости). Трещины являются факторами, увеличивающими поверхность. В их присутствии величина работы образования зародыша может быть настолько уменьшена, что выделение твердой фазы при определенных условиях может произойти даже из не пересыщенного раствора.

В природной воде, главным образом, находится карбонат кальция, значительно реже сульфат кальция и гидроокись магния.

Карбонат кальция в природе встречается в двух кристаллических модификациях – кальцита и арагонита. Кальцит кристаллизуется в форме ромбоэдров, удлиненных призм. Арагонит относится к ромбической системе и может приобретать различные формы.



**Рисунок 1.7 – Модификации карбоната кальция: а – кальцит; б – арагонит**

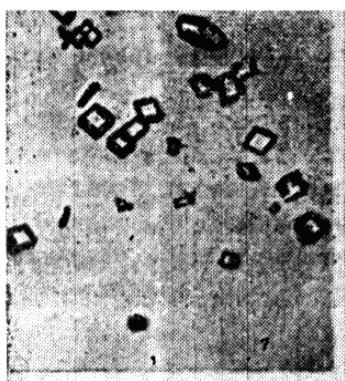
Имеющиеся в литературе сведения противоречивы. Одни исследователи считают, что уменьшение накипи под влиянием магнитного поля связано с образованием, главным образом, стабильной формы карбоната кальция – кальцита. Другие полагают, что это явление вызвано выделением метастабильной модификации – арагонита.

Тебенихиным Е.Ф. [136] было проведено исследование влияния различных факторов на характер выделяющейся из воды твердой фазы. Им установлено, что из моно-раствора бикарбоната кальция при температуре, не превышающей 50 °С, выделяется кальцит, а при более высокой темпе-

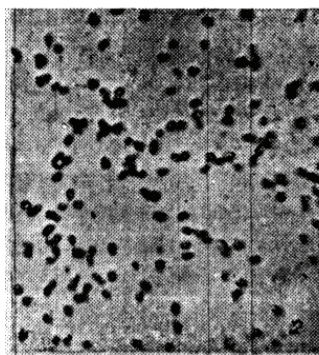
ратуре - арагонит в иглообразной форме. При сравнительно медленной кристаллизации (до 50°C) твердая фаза кальцита успевает сформироваться. С повышением же температуры и, соответственно, увеличением скорости разложения бикарбоната кальция, образуется неустойчивая форма – арагонит. Процесс этот можно затормозить увеличением парциального давления.

Изучение наложения магнитного поля на выделяющуюся твердую фазу карбоната кальция из нестабильной среды (при  $t=20^{\circ}\text{C}$  и  $t=100^{\circ}\text{C}$ ) показало, что изменяются размер и количество кристаллов, но не характер фаз.

Магнитное поле влияет только на геометрический размер кристаллов. С увеличением напряженности магнитного поля твердая фаза становится мельче, а количество частиц (центров кристаллизации) возрастает, что показано на рисунке 1.8 и рисунке 1.9.

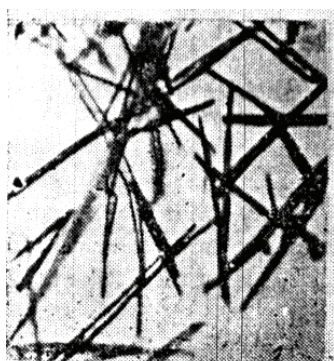


а)



б)

**Рисунок 1.8 – Влияние магнитного поля на модификацию карбоната кальция – кальцит в водном растворе: а – до обработки магнитным полем; б – после магнитной обработки**



а)



б)

**Рисунок 1.9 – Влияние магнитного поля на модификацию карбоната кальция – арагонит: а – до обработки магнитным полем; б – после магнитной обработки**

В практике эксплуатации нагревательного оборудования, при использовании воды, обработанной магнитным полем, наблюдается явление, когда ранее образовавшаяся накипь становится хрупкой, растрескивается,

вспучивается и сравнительно легко отслаивается в виде корок, то есть нагревательный элемент самоочищается. Новая же накипь, если и образуется в незначительном количестве, то через некоторое время отстает. Обычно процесс становится заметным через месяц или два от начала применения магнитной обработки.

Отмеченное явление изучалось многими исследователями, которые по-разному объясняют процесс разрушения накипи. Так, в одних работах воде, обработанной магнитным полем, приписывается повышенная способность растворять карбонатную и смешанную накипь (Б. П. Татаринев, П. С. Стукалов, М. Ф. Скалозубов) [134]. Согласно другим (И. Ф. Домников), коллоидные частицы, образующиеся при обработке воды, проникают в поры накипи, ослабляют сцепление между кристалликами, что и приводит к локальным процессам эрозии, вследствие чего прочность накипи снижается и она отслаивается [148]. Разрушение накипи связано также с процессом дегидратации кристаллов под влиянием магнитного поля, в результате чего изменяется количество связанной в кристаллической решетке воды, нарушаются прочность решетки и монолитность накипи. В конечном итоге все это приводит к ее отслаиванию.

Анализируя все предлагаемые концепции, можно сделать вывод о том, что убедительнее всего выглядит следующий процесс, наблюдаемый на практике.

Под влиянием тепловых потоков и различного теплонапряжения отдельных участков, а так же разного модуля упругости накипи и стальной стенки нагревательного элемента в накипи образуются трещины. Проникающая в них вода испаряется и происходит отложение новой накипи. Таким образом, трещины зарастают. При магнитной обработке воды накипеобразователи выделяются не на поверхности нагрева или охлаждения, а в массе воды, вследствие чего «залечивания» трещин не происходит. Растрескивание увеличивается, прочность сцепления с металлом снижается и накипь отделяется в виде корок. Аналогичный эффект наблюдается при переходе питания котла с жесткой природной воды на мягкую или химически умягченную.

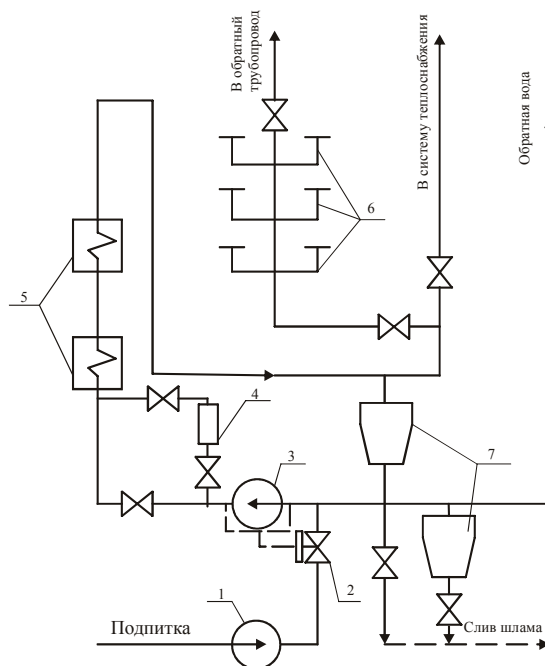
### **1.3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ВОДОПОДГОТОВКИ**

В системах теплоснабжения при нагреве воды образуется накипь и шлам, которые состоят преимущественно, из карбоната кальция и продуктов коррозии стали. В водогрейном оборудовании и трубопроводах горячего водоснабжения образуются отложения оксида железа, количество которого увеличивается при отсутствии периодического удаления из теплоносителя коррозионно-активных газов, кислорода и углекислоты.

Применение магнитной обработки воды позволяет упростить технологические схемы водоподготовки.

Наличие разных видов теплотехнического оборудования обуславливает применение различных технологических схем водоподготовки.

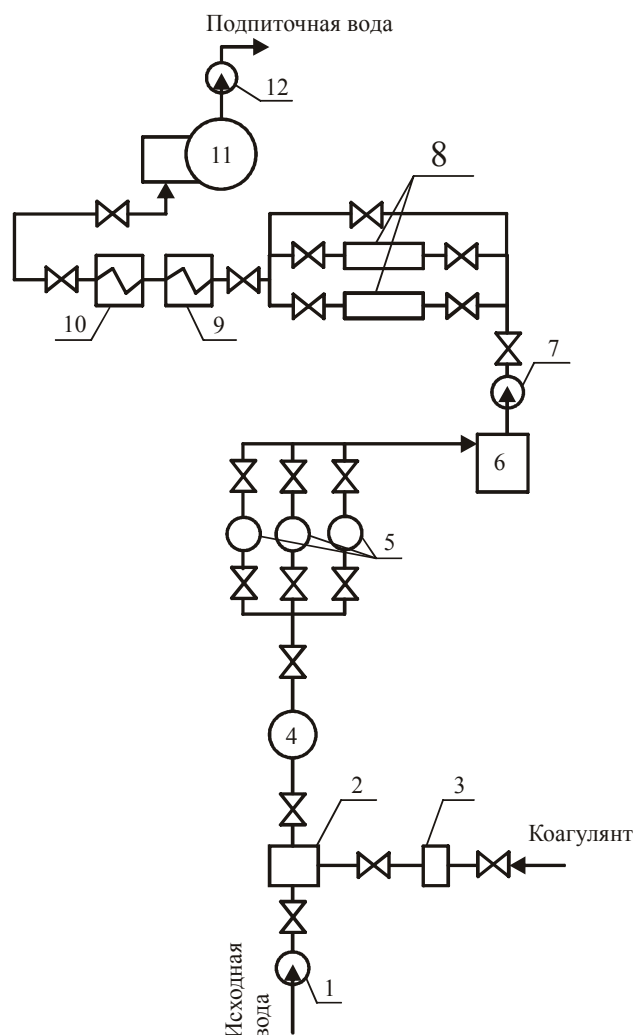
При использовании в тепличных хозяйствах горячего водоснабжения применяется схема представленная на рисунке 1.10.



**Рисунок 1.10 – Технологическая схема открытой системы теплофикации:  
1 – подпиточный насос; 2 – регулятор подпитки; 3 – сетевой насос; 4 – АМОВ;  
5 – подогреватель; 6 – кран; 7 – шламоуловитель**

Производительность устройства подпитки в открытых системах теплоснабжения учитывает расход потребителями горячей воды, а так же расход из-за неплотностей системы. В некоторых системах подпитка водоподготовительной установки может достигать 40-50 % расхода циркулирующей воды.

Подготовка воды зависит от источника ее забора. Очень часто вода поступает из открытого водоема (озеро, река), тогда необходима очистка ее от грубодисперсных взвешенных частиц с последующей магнитной обработкой и термической деаэрацией. Воду целесообразнее обрабатывать до поступления ее в деаэратор и теплообменный аппарат. Перед включением аппарата котел необходимо очистить от накипи, а если очистка не возможна из-за остановки технологического процесса, то нужно установить режим частых продувок системы. Схема подготовки подпиточной воды представлена на рисунке 1.11.



**Рисунок 1.11 – Технологическая схема обработки подпиточной воды. 1 – нагнетательный насос; 2 – смеситель; 3 – дозатор коагулянта; 4 – воздухо- и грязеотделитель; 5 – осветлители КО-2; 6 – бак осветленной воды; 7 – насос осветленной воды; 8 – АМОВ; 9,10 – подогреватели воды; 11 – деаэратор; 12 – подпиточный насос**

Та как нагретая вода поступает потребителям, то необходимо соблюдение требований ГОСТ 2874-73 «Питьевая вода» по следующим показателям: а) цветность; б) прозрачность.

Вода, которая прошла обработку в магнитном поле напряженностью до  $16 \cdot 10^4$  А/м, может быть использована в бытовых целях.

Если для подпитки системы используется водопроводная вода, то схема подготовки значительно упрощается и представляет собой лишь обработку в магнитном поле и деаэрацию воды. На рисунке 1.12 представлена схема подготовки воды к огневым водогрейным котлам.



# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>1 ВОДОПОДГОТОВКА В КОТЕЛЬНЫХ</b> .....	4
<b>1.1 Способы водоподготовки в котельных</b> .....	4
<b>1.2 Процесс воздействия магнитного поля на воду</b> .....	10
<b>1.3 Технологические схемы водоподготовки</b> .....	13
<b>1.4 Аппараты магнитной обработки воды</b> .....	18
1.4.1 Аппараты магнитной обработки воды с постоянными магнитами.....	19
1.4.2 Аппараты магнитной обработки воды с электромагнитами.....	31
1.4.3 Анализ перспектив проектирования аппаратов магнитной обработки воды.....	42
<b>2 МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ АППАРАТА МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ</b> .....	45
<b>2.1 Теория электромагнитного поля</b> .....	45
2.1.1 Электромагнитное поле как форма существования материи.....	45
2.1.2 Основные характеристики электромагнитного поля.....	46
2.1.3 Электромагнитные параметры и классификация сред.....	51
2.1.4 Уравнения Максвелла в интегральной и дифференциальной формах.....	53
2.1.5 Уравнения Максвелла в комплексной форме.....	59
2.1.6 Классификация сред по проводимости.....	61
2.1.7 Классификация электромагнитных полей.....	62
<b>2.2 Цепной метод</b> .....	64
2.2.1 Основные допущения, принимаемые при расчете магнитных цепей.....	64
2.2.2 Расчет неразветвленных магнитных цепей.....	65
2.2.3 Расчет разветвленных магнитных цепей.....	69
<b>2.3 Метод конечных разностей</b> .....	72
2.3.1 Релаксационный метод.....	79
2.3.2 Итерационный метод.....	81
2.3.3 Граничные условия для градиента.....	83
2.3.4 Границы, совпадающие с узлами сетки.....	83
2.3.5 Границы, не совпадающие с узлами сетки.....	88
<b>2.4 Метод конечных элементов</b> .....	92
<b>2.5 Метод интегральных уравнений</b> .....	94
<b>3 РАЗРАБОТКА, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АМОВ</b> .....	95
<b>3.1 Однокатушечный АМОВ</b> .....	95
<b>3.2 Двухкатушечный АМОВ</b> .....	97

<b>3.3 Использование программного комплекса ELCUT при расчете магнитных систем</b> .....	100
3.3.1 Общие сведения.....	100
3.3.2 Создание геометрического объекта.....	106
3.3.3 Задание свойств объекта и решение задачи.....	112
3.3.4 Анализ полученных данных.....	118
<b>3.4 Оптимизационные исследования магнитной системы однокатушечного АМОВ</b> .....	134
<b>3.4 Оптимизационные исследования магнитной системы двухкатушечного АМОВ</b> .....	140
<b>4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АМОВ</b> .....	144
<b>4.1 Способы и методы определения эффективности магнитной обработки воды</b> .....	144
4.1.1 Методы контроля основанные на косвенных показателях.....	144
4.1.2 Методы контроля основанные на учете количества выделившейся твердой фазы.....	149
<b>4.2 Исследование влияния АМОВ на процесс накипеобразования</b> .....	155
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А</b> – Провода марок ПЭВ-1 и ПЭВ-2.....	161
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б</b> – Провод марки ПСД.....	163
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В</b> – Провода марок МГВ, МГВЭ, МГВСЛ, МГВСЛЭ.....	165
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г</b> – Провода прямоугольного сечения.....	166
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д</b> – Результаты расчета однокатушечного АМОВ.....	168
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Е</b> – Результаты расчета двухкатушечного АМОВ.....	173
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Ж</b> – Результаты экспериментальных исследований однокатушечного АМОВ.....	178
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ З</b> – Результаты экспериментальных исследований двухкатушечного АМОВ.....	192
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	206



Научное издание

**Антонов** Сергей Николаевич  
**Адошев** Андрей Иванович  
**Шарипов** Ильдар Курбангалиевич  
**Шемякин** Виталий Николаевич

**АППАРАТЫ МАГНИТНОЙ  
ОБРАБОТКИ ВОДЫ.  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ,  
МОДЕЛИРОВАНИЕ  
И ИССЛЕДОВАНИЕ**

Монография

*Публикуется в авторской редакции*

Подписано в печать 05.02.2014. Формат набора 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Усл. печ. л. 12,78. Гарнитура «Таймс».  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Тираж 500. Заказ № 561/13.

*Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции ОК 005–93–953000*

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии  
издательско-полиграфического комплекса  
СтГАУ «АГРУС», г. Ставрополь, ул. Пушкина, 15.