

1.4 Технологические аспекты применения полимерных фосфатов как ингибиторов коррозии металлов в водных средах

Известно [133-137], что коррозия металлов, и в частности железа и малоуглеродистых сталей, являющихся основными конструкционными материалами систем тепловодоснабжения, имеет электрохимическую природу и обусловлена протеканием двух сопряженных электрохимических реакций: анодной ионизации металла



и катодного восстановления окислительного компонента коррозионной среды, которым для случая водных сред является кислород:



При электрохимической коррозии металлов в воде в результате вторичных процессов продукты катодной и анодной реакций (ионы металла и гидроксильные ионы) могут взаимодействовать друг с другом и компонентами раствора с образованием вторичных продуктов коррозии, которые в дальнейшем могут претерпевать различные изменения. Так, гидроксид железа (II), взаимодействуя с растворенным в воде кислородом, может образовывать гидроксид железа (III), который практически не обладает защитными свойствами [135]:



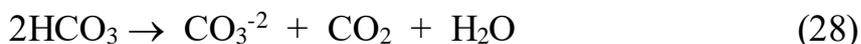
При этом, под воздействием различных факторов (температура, состав коррозионной среды, продолжительность процесса, гидродинамика и др.) гидроксид железа (III) способен трансформироваться в такие соединения как гетит α -FeOОН, акаганеит β -FeOОН, лепидокрокит γ -FeOОН, аморфные фазы $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ и т.п. В работах [138-139] проанализирован состав внутритрубных отложений стальных водопроводов и установлено, что поверхностный твердый слой состоит из оксидов трехвалентного железа красно-бурого цвета (примерно 80%) и примесей оксидов металлов - аналогов железа, карбонатов кальция, магния и других солей, адсорбированных из воды. Пепельно-черный внутренний слой отложений состоит из оксидов и гидроксидов двухвалентного (до 15%) и трехвалентного железа (40-60%), а также кристаллизационной воды и небольшого количества металлического железа и примесей.

Авторы работы [136], используя метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии показали, что слой продуктов коррозии непосредственно прилегающий к поверхности стальной трубы, более богат соединениями двухвалентного железа. Тогда как наружный слой содержит большее количество соединений трехвалентного железа и легче удаляется потоком воды.

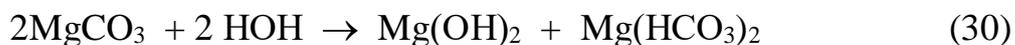
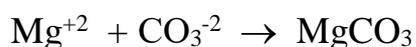
Сато с сотрудниками [141] методами эллипсометрии, кулонометрии и химического анализа показали, что в нейтральных водных средах пленка, сформированная на стали, состоит из внутреннего, практически безводного оксида $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и наружного - сильно гидратированного $\gamma\text{-FeOOH}$. Зачастую рост внешнего слоя контролируется следующей анодной реакцией [135]:



что также подтверждается исследованиями, проведенными в работах [142]. Следует отметить, что железоксидные продукты коррозии образуются в основном в случае коррозии металла при температурах не превышающих 40°C . С повышением температуры состав коррозионных отложений изменяется, поскольку к процессу коррозии подключается и процесс солеобразования, в основе которого лежат различные физико-химические процессы. Поскольку практически все природные воды содержат карбонатные соли, то при нагревании происходит следующая реакция (в ионном виде):



Катионы кальция связывают карбонат-анионы с образованием плохо растворимого карбоната кальция, тогда как катионы магния, вследствие гидролиза растворимого карбоната магния выпадают в осадок в виде гидроксида:



Карбонат кальция и гидроксид магния, наряду с продуктами коррозии железа образуют так называемую накипь, наличие которой на внутренней поверхности трубопроводов и теплообменной аппаратуры значительно снижает пропускную способность труб, увеличивает расход энергии и ухудшает процессы теплообмена.

Коррозию стали в горячей воде обуславливают те же факторы, что и в холодной, и в первую очередь – содержание растворенного кислорода. Однако в открытых системах оборотного водоснабжения при температуре воды $70\text{-}80^\circ\text{C}$ происходит снижение скорости коррозии вследствие сильного уменьшения растворимости кислорода с повышением температуры. Для одного и того же парциального давления при 0°C концентрация растворенного кислорода в воде составляет $20\text{ см}^3/\text{л}$, при 20°C – около $6\text{ см}^3/\text{л}$, при 40° – $4,2\text{ см}^3/\text{л}$, при 80°C – около $2\text{ см}^3/\text{л}$ [143]. В закрытых же системах оборотного водоснабжения коррозия с увеличением температуры увеличивается вследствие торможения свободного выделения кислорода из воды.

Помимо кислорода важным фактором, влияющим на скорость коррозионного процесса, является и рН коррозионной среды. Считается, что при прочих равных условиях, с увеличением рН скорость коррозии

уменьшается, а с понижением – увеличивается. В холодной воде в диапазоне рН = 5-9, скорость коррозии металла практически не зависит от величины рН. В горячей же воде этот диапазон резко уменьшается. При температуре 60°C и выше наблюдается прямая зависимость между скоростью коррозии и рН, причем даже его небольшие изменения влияют на скорость коррозии [144].

В целом следует отметить, что, несмотря на большое количество исследований, посвященных проблеме коррозии металлов в водных средах, как при обычных, так и при повышенных температурах, точная и полная научно обоснованная оценка процессов, протекающих на внутренней поверхности трубопроводов и теплообменной аппаратуры пока невозможна, вследствие многофакторности процесса коррозии – теоретически предполагается, что для полного определения скорости коррозии стали в нейтральных водных средах необходимо знать ее зависимость от 34 параметров.

Тем не менее, в настоящее время практически во всех промышленно-развитых странах успешно разрабатываются различные методы защиты металлов от внутренней коррозии, одним из которых является использование специальных, постоянно дозируемых в воду добавок – **ингибиторов**. Следует сразу оговориться, что зачастую, выбор ингибитора тесно связан с конкретной коррозионной проблемой и ингибиторы, эффективные в одних условиях, могут привести к отрицательному результату в других. К тому же в коррозиологии существует несколько классификаций ингибиторов: в зависимости от природы веществ они делятся на органические и неорганические; от области применения – ингибиторы атмосферной, кислотной, щелочной коррозии, ингибиторы коррозии для нейтральных водных сред; от условий применения – высокотемпературные, низкотемпературные, растворимые в воде или в углеводородах и т.д. В зависимости от химического состава активной составляющей, обеспечивающей торможение коррозии металлов, ингибиторы подразделяются на фосфаты, силикаты, молибдаты, нитриты, бензоаты и др.

Все вышеизложенное обуславливает огромное количество веществ, которые могут быть использованы в качестве ингибиторов коррозии металлов, однако по экономическим, технологическим, экологическим причинам и требованиям практическое применение находят лишь несколько классов соединений, из которых в системах коммунально-бытового тепловодоснабжения разрешены к применению лишь неорганические фосфаты, в том числе и полимерные, и водорастворимые силикаты.

Опыт применения фосфатов в практике защиты металлов и металлоконструкций от коррозии насчитывает не одно десятилетие. За это время накоплен достаточно большой материал по составам фосфатных растворов и их композиций, а также по технологии их применения. Защитное

действие фосфатов обусловлено образованием на поверхности металла защитных пленок путем его обработки фосфатсодержащими средами. Как правило, такие пленки состоят либо только из фосфатов металла, либо содержат еще оксиды и гидроксиды железа. Состав, структура и противокоррозионные свойства пленок зависят от многих факторов, и в первую очередь, от концентрации используемых фосфатов и технологии их применения.

Так, концентрированные растворы ортофосфорной кислоты, растворы содержащие фосфат цинка, фосфат марганца, растворы полифосфатов и полифосфорных кислот используют для получения на поверхности металла кристаллических фосфатных защитных пленок – так называемое фосфатирование металлов.

Следует отметить, что несмотря на большое количество рецептов растворов фосфатирования, на практике, в силу ряда причин, используют лишь их небольшую часть. К ним относятся растворы ортофосфорной кислоты [145-147] и дигидромонофосфатов цинка [148-150], марганца [151-153], железа [154,155], кальция [156,157] - для получения кристаллических фосфатных пленок и растворы дигидромонофосфатов натрия, кальция, аммония [158] - для получения аморфных пленок. Наиболее высокими противокоррозионными свойствами обладают пленки, полученные из растворов – композиций нескольких металлов [159-161]. Кроме состава фосфатных растворов, на защитные свойства фосфатных пленок сильно влияет кислотность раствора фосфатирования, так как в формировании защитных пленок или покрытий принимают участие лишь H_3PO_4 или H_2PO_4^- -ионы.

Было установлено [162], что оптимальное соотношение суммарного содержания H_3PO_4 и H_2PO_4^- -ионов к содержанию свободной фосфорной кислоты должно составлять 7:1 – 8:1, так как содержание H_3PO_4 выше оптимального ухудшает защитные свойства пленки и увеличивает время ее образования, а меньшая концентрация H_3PO_4 , наряду с потерей защитных свойств, приводит к шламообразованию и загрязнению растворов плохо растворимыми гидромонофосфатами, образующимися вследствие гидролиза дигидромонофосфатов.

Фосфатировать можно практически все металлы, образующие нерастворимые фосфаты при взаимодействии с фосфорной кислотой или дигидромонофосфатами, однако, существенную роль в деле создания защитных пленок при этом играет подготовка поверхности металлов. Наилучшие результаты достигаются при механической предварительной подготовке поверхности – пескоструйной, абразивной и др. [163].

Наряду с составом и концентрацией растворов фосфатирования, а также видом подготовки поверхности металла, структуру и защитные свойства

фосфатных пленок определяет температура растворов фосфатирования. Повышение температуры активизирует процесс образования фосфатных пленок, вместе с тем увеличивается скорость роста кристаллов фосфатов, поверхность становится неоднородной, что ведет к снижению защитных свойств. Фосфатирование при температурах, близких к температурам кипения фосфатирующих растворов, сопровождается также взмучиванием образующегося осадка, адсорбируемого фосфатной пленкой, что также ведет к потере однородности, а следовательно, и защитных свойств пленки. В связи с вышеизложенным, в последнее время уделяется большое внимание разработке технологий и составов для низкотемпературного фосфатирования [164-168], однако высокая длительность процесса в данном случае тормозит практическое применение таких технологий.

Технологии нанесения фосфатных покрытий на металл можно подразделить на две группы – погружное фосфатирование и аэрозольное. Несмотря на довольно высокие антикоррозионные свойства фосфатных пленок, сложности, возникающие на стадии подготовки поверхности металла, ограничивают использование данного метода противокоррозионной защиты.

Более перспективным в плане практического применения является разработка модификаторов или преобразователей ржавчины на основе фосфатных композиций.

Отличительной особенностью преобразователей ржавчины является покрытие металлической поверхности без предварительной очистки ее от продуктов коррозии, что снижает стоимость композиций, способствует улучшению экологической обстановки и позволяет улучшить физико-механические показатели лакокрасочных покрытий, формируемых на поверхности металла после обработки композицией.

Большинство запатентованных композиций содержат в своем составе ортофосфорную кислоту и цинксодержащее соединение [169-173]. Другие [174-175] наряду с термической ортофосфорной кислотой содержат гидролизный лигнин или кубовый остаток производства диметилфосфита и калий железосинеродонистый.

Основным продуктом фосфатирования при применении модификаторов ржавчины, по данным [175], является вивианит $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8 H_2O$.

Образование фосфатных пленок на поверхности металла возможно не только в концентрированных фосфатных растворах, но и путем постоянного дозирования малых количеств фосфатов в растворы (в случае контакта металла с водными средами) – **ингибирование** коррозии металла.

Фирмы, являющиеся разработчиками и поставщиками ингибиторов коррозии и накипеобразования действуют во многих странах мира, в том числе в США (Nalco, Calgon, Texaco Inc., Petrolite Corporation, Mobil и т.д.), Великобритании (Hauseman Ltd., Wright Chemical, Dearborn Chemicals и т.д.),

Германии (BASF, Bayer), Японии, Голландии и др. Ориентировочные сопоставительные данные по производству и потреблению ингибиторов коррозии в промышленно-развитых странах, а также в России и странах СНГ представлены в таблице 1 [176].

Из анализа представленных данных следует, что по производству и потреблению ингибиторов Россия и страны СНГ примерно в 7-8 раз уступают промышленно-развитым странам. В Казахстане собственное производство ингибиторов коррозии отсутствует за исключением конъюнктурно заявленных марок, обеспеченных лишь лабораторным или опытным производством [177-183]. Тем не менее, организация промышленного многотоннажного производства высокоэффективных полифосфатных ингибиторов вполне реальна в нашей республике на базе местного сырья (фосфориты Каратау) и существующих мощностях фосфорных и фосфатных заводов Южного Казахстана.

Зарубежные данные свидетельствуют о многолетнем успешном применении неорганических фосфатов, являющихся традиционными ингибиторами для защиты оборудования и систем теплоснабжения от внутренней коррозии. Их широкое применение обусловлено с одной стороны их экономической и технологической доступностью, с другой – санитарно гигиеническими требованиями: они не токсичны, не кумулятивны и не мутагенны.

Единственным показателем, ограничивающим их применение в питьевом водоснабжении в Казахстане, как и в странах СНГ и России, является органолептический: появление мути при кипячении воды, содержащей более 5 мг P_2O_5 /л [184]. Это объясняется гидролизом полимерных фосфатов до монофосфатных анионов и связыванием последних катионами кальция с образованием гидромонофосфата кальция.

Одним из эффективных зарубежных фосфатных ингибиторов коррозии исследованных в нашей стране оказался ингибитор Д-45-12 компании Nalco (США), представляющий собой цинк-фосфатную композицию [185].

В Германии для предотвращения коррозии трубопроводов в систему питьевого водоснабжения с помощью специальных дозаторов вводится смесь фосфатов и силикатов [186].

Для противокоррозионной защиты оборудования и трубопроводов систем питьевого водоснабжения авторы [187] предлагают вводить 0,1 – 20 г/м³ перекиси водорода, 0,1 – 7 г/м³ монофосфата натрия (в пересчете на P_2O_5) и/или 0,2 – 50 г SiO_2 /м³ силиката натрия.

В работе [188] рассмотрены свойства и технология применения фосфорсодержащих ингибиторов коррозии и накипеобразования Силифос и Гилуфер (фирма-разработчик ВК Giulini Chemie, Германия) для защиты систем холодного и горячего водоснабжения и теплосетей.

Таблица 1. Ориентировочные данные по производству, потреблению и разработке ингибиторов коррозии и противокоррозионных присадок

Тип данных	США-Канада- Япония	Страны ЕЭС	Россия и стра- ны СНГ (включая Украину)
Общее производство и потребление, тыс. т/год	1400	600	200
Процент от общего количества:			
- нефтяных и синтетических сульфонатов	70	60	50
- кислородсодержащих (бензоаты, гликоли и пр.)	10	15	10
- азотсодержащие соединения	15	20	30
- фосфор- и серофосфорсодержащие ПАВ	5	5	10
Крупнейшие фирмы, занимающиеся разработкой ингибиторов коррозии	Esso, КАО, Амоко витко, Стандарт Ойл, Дауберт, Навин и др.	BASF, Кастрол, Калюбройл, Петролайт, ЛобаХеми и т.д.	ВНИИ НП, ИФХАН, Ассокор, НПО-НИИ «Нефтепромхим», Леннефтехим, АО НИИ «Синтез» и др.
Ориентировочное число марок ингибиторов коррозии:			
- реально производящихся в промышленных количествах	<100	<80	<30
- лабораторных образцов	80	60	<250
Производство ингибирующих композиций, тыс.т/год	800	40	40

Авторами работы [189] было исследовано применение солей цинка и полифосфатов в качестве ингибиторов в нейтральных водных средах. Было

установлено, что наибольшая степень защиты достигается при концентрации хлорида цинка более 8 мг/л, полифосфатов более 5 мгP₂O₅/л и соотношении Ca:P₂O₅ = 1:3.

Для защиты от коррозии водопроводных труб запатентована ингибиторная смесь из ZnSO₄·H₂O (56%), NaH₂PO₄ (24%) и сульфаминовой кислоты (20%). Для эффективной защиты удаленных от места обработки участков требуется не более 3 мг/л этой смеси в пересчете на цинк. После образования пленки концентрация смеси может быть уменьшена в 2-3 раза. В результате обработки воды р.Колорадо (общее солесодержание 750 мг/л, рН = 8,4; хлориды – 125 мг/л; сульфаты - 350 мг/л) указанной трехкомпонентной смесью скорость коррозии водопроводных труб удалось снизить на 94,8%. Язвенная коррозия была устранена полностью, а содержание железа в воде уменьшилось до 0,04 мг/л, тогда как стабилизационной обработкой воды, а также обработкой ее полифосфатами добиться заметного снижения коррозии не удалось [190].

В работе [191] изучено защитное действие ингибирующей композиции, включающей полифосфат натрия, сульфат цинка и бихромат калия. Установлено, что защитный эффект при использовании композиции в водах с низким солесодержанием (<300 мг/л) составляет 96%, а с увеличением солесодержания эффективность защиты снижается до 85%.

В таблице 2 приведена характеристика некоторых других цинк-фосфатсодержащих ингибиторных композиций, выпускаемых в основном промышленностью США [185,192].

Коррозионные испытания цинк-фосфатных ингибирующих композиций показали их высокую эффективность при использовании в оборотных системах охлаждения нефтехимических заводов Великобритании, Франции, Германии, Бельгии, Греции [185,192-195] и на водоочистных станциях для противокоррозионной обработки воды [196]. Преимущество таких композиций заключается в том, что их эффективность мало зависит от состава воды. Цинк повышает скорость образования защитной пленки и тормозит коррозию стали в период ее формирования. Кроме того, цинк, при относительном содержании выше 10 %, проявляет синергетическое действие, что позволяет снизить концентрацию ингибитора [197].

Поскольку ингибирующие свойства цинк-фосфатных композиций обеспечиваются двумя составляющими – ионами фосфата и цинка, а другие ионы являются балластными, и даже активизирующими коррозионные процессы (например, ионы SO₄²⁻, присутствующие в композиции в составе сульфата цинка), то более целесообразным является использование в качестве ингибиторов фосфатов цинка.

В таблице 3 приведена характеристика ингибиторов, получаемых на основе фосфатов цинка различного состава [193].

Таблица 2. Цинк-фосфатные ингибиторы коррозии

Корпорация-изготовитель	Ингибитор	Основной химический компонент	Форма выпуска
1. Shannon Chemical Corporation PO Box 376. PA 9355	Shan-no-cor	Гексаметафосфат натрия, соли цинка, щелочи	Сухой
2. Baroid	CS-438	Точный состав не сообщается, включает фосфаты и цинк	Сухой
3. Petrolite			
4. Tros	ASW-18	-“-	Жидкий
5. Prodeco	C2004A	-“-	Сухой
	SR-210T	-“-	Жидкий

Таблица 3. Ингибиторы на основе фосфатов цинка

Корпорация-изготовитель	Ингибитор	Основной химический компонент	Форма выпуска
1. Astro Water Engineers Incorporated PO BOX 182, 60558	СТ-195	Биметаллический стеклофосфат	Жидкий
2. Calgon Company BOX 146, MO63166	ТС	Натрий-цинк-фосфат	Сухой
	ТС-10	Натрий-цинк-фосфат	Сухой
	С-8	Метафосфат цинка	Сухой
	С-9	Ортофосфат цинка	Жидкий
	С-39	Натрий-кальций-цинк стеклофосфат	Сухой
3. Virginia Chemicals 3340 A2373	Вирхем931	Фосфат цинка	Сухой
	Вирхем932	Ортофосфат цинка	Сухой
	Вирхем937	Метафосфат цинка	Жидкий

При исследовании влияния полифосфатов на коррозию систем горячего водоснабжения, изготовленных из стальных неоцинкованных и оцинкованных труб, было отмечено, что во втором случае скорость локальной коррозии

уменьшилась в 4 раза, тогда как для неоцинкованных труб – лишь в 2 раза [143].

В качестве перспективной технологии по защите внутренней поверхности оборотных систем охлаждения от коррозии авторы [198] предлагают обработку воды фосфорсодержащими комплексонами.

Американские исследователи предложили способ ингибирования внутренней коррозии и солеотложений в водных охлаждающих системах путем добавления к воде сульфоновой кислоты или ее солей в смеси с фосфатами [199].

Российскими учеными для ингибирования внутренней коррозии и солеобразования в оборотных системах предложен состав (мг/л): 90 – 100 триполифосфата натрия (в пересчете на P_2O_5) и 0,9 – 1,2 сульфата цинка (в пересчете на катион Zn^{+2}) [200].

Авторами [201-202] синтезированы полифосфаты натрия, модифицированные оксидом цинка в диапазоне составов $R=1,0\div 1,3$ и в лабораторных условиях показано, что в водах с повышенным содержанием сульфат-ионов (1000 мг/л) полифосфаты натрия-цинка ингибируют скорость коррозии латуни в диапазоне концентраций 5 – 40 мг P_2O_5 /л, причем для одной и той же концентрации увеличение отношения оксида металла к пентаксиду фосфора в фосфате повышает степень его защитного действия. По отношению к нелегированной стали (Ст3) эти же соединения в сульфатсодержащих растворах промотируют скорость коррозии в диапазоне концентраций от 10,0 до 100,0 мг P_2O_5 /л.

В работе [203] исследовался ингибитор ФКБ в оборотной воде теплообменного оборудования производственного объединения "Азот" (г.Ровны), представляющий собой смесь гидрофосфатов, применение которого позволило снизить скорость коррозии стали в среднем в 10-20 раз.

Авторы работы [204] полагают, что для реагентной обработки оборотной воды более эффективно использование триполифосфата натрия, чем дифосфата. В работе [205] показано, что применение цинкхроматофосфатной композиции, при концентрациях компонентов равных 0,5-2,0 мг Zn^{+2} /л, 0,8-1,7 мг CrO_4^{2-} /л и 1-4 мг PO_4^{3-} /л, обеспечивает ингибирование коррозии и солеотложения на 85-98% в оборотной воде газоперерабатывающих заводов с солесодержанием 0,7-55,0 г/л при температуре воды 70°C.

Авторами [206] патентуется способ защиты стали от коррозии в водных средах, включающий дозирование в обрабатываемую среду ингибирующей композиции на основе нитрита натрия, ортофосфорной кислоты и азотсодержащего органического соединения.

Предприятия нефтехимической промышленности Германии в качестве ингибиторов коррозии и накипеобразования наиболее широко используют сульфат цинка, соли фосфорной кислоты и сополимеры окисей этелена и

пропилена, что позволяет поддерживать скорость коррозии водоохлаждающих систем не более 0,1 мм/год [207].

Польскими учеными [208] разработаны эффективные ингибиторы внутренней коррозии стальных трубопроводов системы Варшавского коммунального водопровода типа «Силеналь», представляющие собой механическую смесь растворов метасиликата и гексаметафосфата натрия, взятых в соотношении $\text{SiO}_2:\text{P}_2\text{O}_5 = 10:1$. Разработанный ингибитор не токсичен, стабилизирует жесткость воды, однако требует строгого контроля за содержанием метасиликата натрия, поскольку превышение его концентрации может повысить pH обрабатываемой воды, что не желательно, особенно в коммунальном водоснабжении.

В немецкой заявке [209] патентуется ингибитор для защиты от коррозии нелегированной и низколегированной стали, меди и свинца в системах питьевого водоснабжения, содержащий силикат- и фосфат-ионы в соотношении 1:2 – 1:4 при содержании фосфата 6% и силикатов 1,5-10% (в пересчете на SiO_2).

А.Я.Найманов [210] для защиты от внутренней коррозии труб, транспортирующих донскую воду, применил ингибиторную смесь следующего состава (мг/л): тринатрийфосфат 1,2; гексаметафосфат натрия 0,5; силикат натрия 10,0. Исследование этой смеси в лабораторных и полупромышленных условиях дало положительные результаты.

Авторами [211] в качестве эффективного ингибитора коррозии внутренней поверхности стальных водопроводных труб предложена смесь дигидрофосфатов натрия или кальция с силикатом натрия. Как показали проведенные лабораторные исследования скорость коррозии нелегированной стали в случае применения комбинированного ингибитора в диапазоне концентрации фосфата 0,1-0,0005 моль/л с добавкой 0,001 моль/л метасиликата натрия в 2 раза ниже, чем в случае использования одного дигидрофосфата кальция, и на порядок – в случае дигидрофосфата натрия. Применение в качестве ингибитора силиката натрия в указанной концентрации снижает скорость коррозии стали в 1,5 раз.

В работах [212-213] показана зависимость ингибирующих свойств силикат-фосфатных композиций от природы, структуры и способа получения силикатной составляющей композиции. Установлено, что максимальное ингибирующее действие проявляется в случае присутствия в растворе метасиликат-ионов – SiO_3^{2-} , тогда как присутствие в растворе ди-, трисиликат-ионов, а также коллоидного кремнезема снижает степень ингибирующего действия с 93,8% до 20,0%. Авторами предложено использовать в качестве силикатной составляющей ингибирующих композиций раствор жидкого стекла, активированный сульфатом алюминия и показано, что обмен ионов двухвалентного железа (первичного продукта коррозии) на противоионы

натрия диффузного слоя щелочного алюмосиликатного золя приводит к к проникновению катиона железа в адсорбционный слой и потере седиментационной устойчивости частиц золя. В результате хемосорбционного взаимодействия катионов железа и потенциалоопределяющих силикат-ионов на поверхности металла образуется качественно новый защитный слой состава $\{mAl_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot nFeSiO_3\}$, обеспечивающий высокую степень защитного действия.

Лабораторными исследованиями, проведенными в работах [28,214-217], установлено, что степень защиты от коррозии малоуглеродистой стали 97-98% достигается при антикоррозионной обработке воды силикополифосфатами кальция, цинка или марганца. Использование предлагаемых ингибиторов позволяет также снизить обрастание стальной поверхности продуктами коррозионных отложений и солями жесткости. Показано также, что на поверхности металла формируется качественно новая защитная пленка, обладающая эффектом последействия, что позволяет проводить циклическую обработку воды разработанными ингибиторами.

Несмотря на огромное разнообразие составов фосфатных ингибиторов и композиций на их основе, общими для них является наличие зависимости степени или эффективности защитного действия от концентрации фосфат-ионов, имеющей, как правило, экстремальный характер. Также точно установлено, что полифосфаты наиболее эффективны в движущейся воде в присутствии кислорода и двухвалентных катионов таких металлов как кальций, цинк и железо.