

Внутренняя коррозия в открытых системах теплоснабжения и пути её снижения

В.С. Слепченко, инженер, ГУП «ТЭК СПб»,
К.Н. Брусов, к.т.н., АОО «Колтроникс», Санкт-Петербург

Накопленный в ГУП «ТЭК СПб» опыт показывает, что существуют реальные возможности улучшить работу открытых систем. Для этого необходимо наряду с внедрением новых тепло гидроизоляционных покрытий трубопроводов сосредоточить усилия на максимально возможном снижении внутренней кислородной коррозии

Существующие системы теплоснабжения Санкт-Петербурга характеризуются высокой повреждаемостью, большими тепловыми потерями и, как следствие, недостаточной (ниже расчётной) экономичностью эксплуатации тепловых сетей. Низкая надёжность и экономичность тепловых сетей - следствие технической политики, проводившейся в нашей стране на протяжении нескольких десятилетий. Снижение надёжности трубопроводов и их разгерметизация значительно увеличивают непроизводительные затраты по эксплуатации тепловых сетей, на предприятиях, в дорожно-транспортном хозяйстве и благоустройстве города, увеличивают расходы на ликвидацию последствий аварийных ситуаций и подтопления территорий. Величина непроизводительных затрат и ущерба в городском хозяйстве составляет 5-6 тыс. \$ на 1 км тепловой сети в год. Одной из причин снижения надёжности является внутренняя коррозия трубопроводов. Влияние внутренней коррозии на уровень эксплуатации систем теплоснабжения с открытым горячим водоразбором рассмотрим на примере ГУП «ТЭК СПб» - одного из крупнейших производителей и поставщиков тепловой энергии на нужды теплоснабжения города.

Характеристика тепловых сетей ГУП «ТЭК СПб»

На балансе ГУП «ТЭК СПб» по состоянию на 1.01.1999 г. находятся 5312 км трубопроводов тепловой сети в однострубно́м исчислении диаметром от 57 до 1400 мм, из них 770,5 км с диаметром свыше 325 мм - магистральные трубопроводы. Тепловая энергия от собственных котельных транспортируется по тепловым сетям предприятия, которые составляют 61% балансовой длины. 39% балансовой длины трубопроводов транспортируют тепло от восьми ТЭЦ

АО «Ленэнерго» и нескольких ТЭЦ и котельных других организаций города. Распределение длины сетей по диаметрам трубопроводов для сетей от собственных и сторонних теплоисточников показано на рис.1.

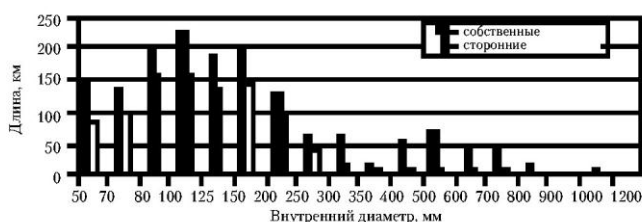


Рис.1. Распределение протяженности тепловых сетей предприятия по внутренним диаметрам трубопроводов собственных и сторонних источников тепла.

Общее количество трубопроводов, которые транспортируют тепло в системах теплоснабжения с открытым горячим водоразбором, составляет 4 903 км. Около 390 км транспортируют тепло в системах закрытого теплоснабжения, в основном от котельных мощностью до 12 МВт (групповых). Транспортировка потребителям воды только для нужд горячего водоснабжения осуществляется

трубопроводами длиной около 516 км.

Большая часть сетей работает на деаэрированной невской воде городского водопровода. В котельных мощностью менее 12 МВт деаэрация воды в основном отсутствует. Только 77,6 км (2%) трубопроводов тепловой сети предприятия оборудованы установками защиты от блуждающих токов.

Повреждаемость тепловых сетей

За период 1997-1999 гг. среднегодовая удельная повреждаемость тепловых сетей предприятия составила 1,2 отк./км трубопровода, за отопительный сезон -0,26 отк./км. Исходя из актов осмотра дефектных труб персоналом филиалов предприятия, следует, что большая часть повреждений (73-77%) обусловлена наружной коррозией. Это согласуется с данными наблюдений за тепловыми сетями других предприятий [1,2,3]. Однако необходимо отметить, что около 45-50% отказов на тепловых сетях связаны с трубопроводами, которые имели явные признаки совместного действия внутренней и наружной коррозии на поверхности металла труб. Но поскольку наружная коррозия была проявлена более активно, чем внутренняя, коррозия трубопровода, эксплуатационный персонал определил причиной появления отказа первую из них. Повреждения, вызванные внутренней коррозией, обычно имеют вид небольших сквозных отверстий, когда дно коррозионной лунки достигает внешней поверхности трубы или щели в сварочном шве. Протечки через такие повреждения невелики, и их трудно обнаружить. Обычно они своевременно не устраняются. Сетевая вода, выходя под давлением из сквозного отверстия, увлажняет и разрушает гидро- и теплоизоляцию. В результате на наружной поверхности трубы создаются благоприятные условия для интенсивного развития наружной коррозии. В отличие от внутренней коррозии наружная реализуется как сплошное утонение металла на большой площади. Когда толщина стенки трубы уменьшается до критической величины, она разрушается, образуя интенсивную протечку теплоносителя. Эти предположения требуют корректировки результатов осмотра эксплуатационным персоналом дефектных участков трубопроводов. В результате корректировки можно утверждать, что именно внутренняя коррозия является первопричиной возникновения около половины отказов на трубопроводах, хотя причиной была указана наружная коррозия. Для уточнения вклада внутренней коррозии была проанализирована статистика устраненных повреждений трубопроводов предприятия за 1997-1999 гг. с учетом их диаметра, условий прокладки сетей и направления движения теплоносителя. На рис. 2 показано отношение повреждений в подающих и обратных трубопроводах для всех сетей и отдельно для участков подвальной прокладки.

Из рис.2 видно, что повреждаемость подающих трубопроводов для сетей в целом и на участках подвальной прокладки была примерно в 3-4 раза выше, чем в обратных

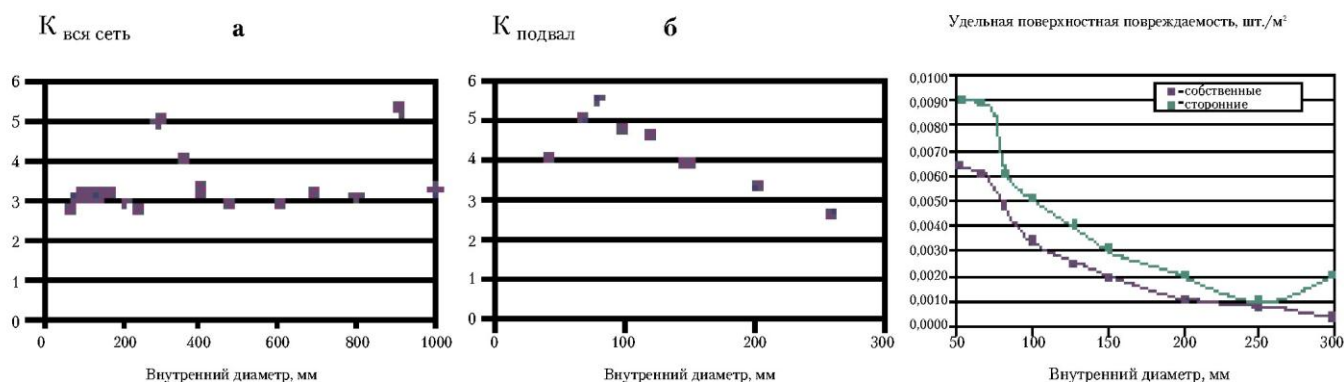


Рис.2. Отношение количества повреждений в подающих и обратных трубопроводах в зависимости от диаметра (устраненных в 1997-1999 гг.): а – сети в целом, б – участки подвальной прокладки.

Рис.3. Зависимость удельной поверхностной повреждаемости сетей от диаметра трубопровода.

трубопроводах. Поскольку на участках подвальной прокладки наружной коррозией в масштабах всего предприятия можно пренебречь, то следует признать, что различия в повреждаемости были вызваны внутренними причинами, а именно различиями физико-химических параметров теплоносителя. Эти различия сохраняются и для сети в целом. То обстоятельство, что и в этом случае наблюдалось приблизительно такое же соотношение повреждаемости прямых и обратных трубопроводов, дает основания полагать, что доминирующий вклад в повреждаемость сетей вносит внутренняя, а не внешняя коррозия.

На решающую роль внутренней коррозии указывает также зависимость удельной поверхностной повреждаемости (количество повреждений на единицу площади поверхности трубопровода) от диаметра трубопроводов, рис.3.

В диапазоне диаметров 50-200 мм сетевые трубопроводы имеют исходную толщину стенки 3,5-4,5 мм. Весьма небольшие различия в толщине стенки не существенны для наружной коррозии. Поэтому с ее помощью невозможно объяснить наблюдаемые гладкие зависимости снижения повреждаемости в 5-6 раз при увеличении диаметра от 50 до 200 мм. Напротив, как будет показано ниже, внутренняя коррозия, помимо прочих факторов, существенно зависит от гидродинамики потока, что определяет влияние диаметра трубы на ее повреждаемость.

Перенос кислорода в системах теплоснабжения

Исходной причиной коррозии углеродистой стали в природных водах при умеренных параметрах является растворенный в воде кислород. Известно [5], что чистая поверхность железа очень быстро вступает в реакцию с растворенным кислородом, и скорость всего процесса определяется (лимитируется) возможностями его доставки. Другие коррозионнозначимые факторы опосредуют действие кислорода через влияние на свойства слоев продуктов коррозии, образующихся на поверхности стали. Если образуются слои, которые эффективно препятствуют проникновению через них кислорода, стальные конструкции могут длительное время сохранять полезные свойства. В противном случае сталь будет быстро разрушаться.

Теплосеть представляет собой протяженный замкнутый стальной контур с циркулирующим теплоносителем и локализованным источником поступления кислорода. Этим источником служит обычно подпиточная вода. Кислород в подпиточной воде присутствует в основном из-за неполной деаэрации сырой воды, присосах охлаждающей воды в охладителях деаэратора, вторичной аэрации в баках-аккумуляторах и присосах воздуха в подпиточном тракте.

Распространяясь от источника вместе с теплоносителем, кислород постепенно расходуется в коррозионных реакциях со стальными стенками трубопроводов. В результате его концентрация по мере удаления от источника снижается, а более удаленные участки сети (обратные трубопроводы), работающие в диапазоне более низких температур, защищаются от коррозии образованием защитных пленок.

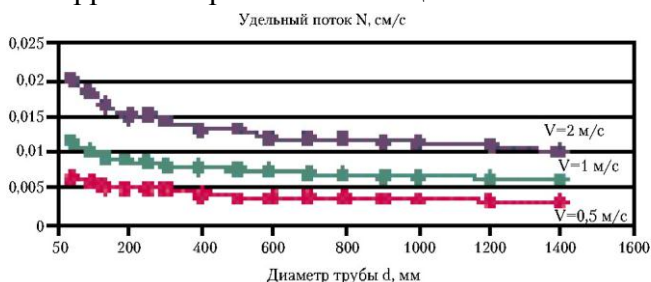


Рис.4. Зависимость удельного потока массы кислорода на стенку трубопровода от диаметра.

На большинстве участков сети, за исключением домовых систем, теплоноситель движется в турбулентном режиме. Для круглой трубы массоперенос в турбулентном потоке описывается критериальным уравнением [6]:

$$Nu=0,023 Re^{0,8} Sc^{0,33} \quad (1),$$

где Nu- число Нуссельта, Re- число Рейнольдса, Sc-число Шмидта.

Критериальные числа определяются

как: $Nu = N d / (D (c_b - c_o))$, $Re = V d / \nu$, $Sc = \nu / D$ (2),

где N - удельный поток массы (на единицу концентрации) на поверхность трубы, d - диаметр трубы,

D - коэффициент диффузии кислорода, c_b , c_o - концентрация кислорода в ядре потока и на поверхности трубы, соответственно, ν - кинематический коэффициент вязкости. Исходя из уравнения (1) были рассчитаны возможные значения потока массы кислорода на стенку N для средних условий теплосети.

Как видно на рис.4, удельный поток кислорода N увеличивается при росте скорости движения теплоносителя и уменьшении диаметра трубы. Эта зависимость качественно подтверждает вывод о преимущественно внутренних причинах коррозии, который был

сделан при рассмотрении результатов на рис.3. Количественные расхождения могут быть устранены, если учесть, что ранее при проектировании сетей принимали более высокие скорости в трубах меньшего диаметра, а также наличие ржавчины, ускоряющее со временем движение теплоносителя тем больше, чем меньше диаметр.

Для сетей в целом возможный диапазон изменения N составляет 0,004-0,02 см с⁻¹. Это означает, что при одной и той же концентрации кислорода скорость коррозии в сети может меняться в 5 раз.

Исходя из уравнения (1), были рассчитаны и сопоставлены с измерениями в сетях величины поглощения кислорода в стальных водогрейных котлах и на участках трубопроводов различных диаметров, так как процессы, возникающие в них, в целом идентичны. Расчеты показывают, что при работе водогрейный котел ПТВМ-50 должен поглощать около 50% поступающего в него кислорода.

Как видно на рис.5, полученное расчетное значение удовлетворительно согласуется с результатами измерений кислорода, выполненных на нескольких работающих котлах ПТВМ-50.

На рис.6 приведены результаты расчетов коррозионного поглощения кислорода в сетевых трубопроводах в форме длины участка LQ 5, на котором концентрация кислорода уменьшается в два раза. Согласно им для уменьшения концентрации кислорода в магистральных трубопроводах диаметром больше 400 мм необходимо от 1 до 4,5 км трассы, тогда как в распределительных трубопроводах для этого нужно всего несколько сотен метров.

Оценочные расчеты изменения концентрации в тепловой сети с типовым теплоисточником мощностью 320 МВт показали, что основное падение концентрации кислорода должно происходить в распределительных трубопроводах диаметром 150-200 мм. Отношение концентрации кислорода в сетевой воде на выходе из котельной (подающий трубопровод) к концентрации кислорода на входе (обратный трубопровод) должно быть не меньше 4-5. Действительно, при корректном отборе пробы концентрация кислорода на выходе из котельных предприятия составляет в среднем 40-50 мкг/кг, обратная вода обычно содержит менее 10 мкг/кг кислорода. Таким образом, результаты анализа статистики повреждаемости сетей предприятия и переноса в них кислорода приводят к согласованному выводу - надежность, длительность и эффективность работы систем теплоснабжения существенно сильнее зависят от интенсивности внутренней кислородной коррозии, чем считалось ранее. Качественное улучшение характеристик работы открытых систем только путем совершенствования теплогидроизоляции сетевых трубопроводов без существенного улучшения водно-химического режима представляется маловероятным.

Методы борьбы с кислородной внутренней коррозией

Радикальный метод сведения к минимальному уровню процесса внутренней коррозии - устранение путей попадания кислорода в подпиточную и сетевую воду. Ликвидация этих

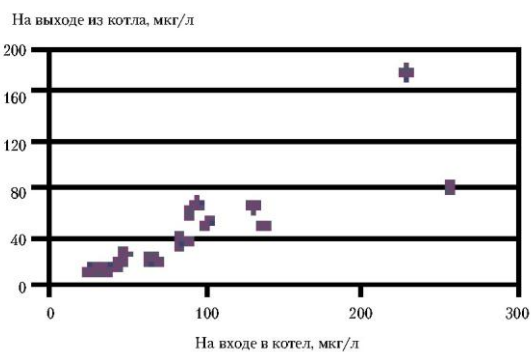


Рис.5 Концентрация кислорода, мкг/л на выходе работающих котлов ПТВМ-50 в зависимости от входной концентрации кислорода.

путей требует больших капитальных затрат на переоснащение технологических схем и оборудования котельных, переход на закрытую схему теплоснабжения, на переоборудование индивидуальных тепловых пунктов зданий, центральных тепловых пунктов и домовой системы горячего водоснабжения. Естественно, в обозримом будущем это маловероятно. Другой метод - всемерное ужесточение требований к содержанию кислорода, качественное повышение уровня контроля за его содержанием и проведение антикоррозионных мероприятий, включающих надежную консервацию систем в межотопительный

период и коррозионное ингибирование сетевой воды в отопительный период.

Длительное применение силиката натрия в качестве рекомендуемого нормативного ингибитора кислородной коррозии не выявило его заметной эффективности, но вместе с тем показало, что на верхнем разрешенном уровне 30-40 мг/л наблюдается заметное ухудшение органолептических свойств горячей воды. В настоящее время силикат натрия в качестве ингибитора на тепловых сетях предприятия практически не применяется. Других эффективных ингибиторов кислородной коррозии, допустимых к применению в воде питьевого качества, до последнего времени известно не было.

Следует отметить, что предлагаемые сегодня композиции фосфоновых кислот и солей цинка являются по прямому назначению эффективными ингибиторами карбонатных отложений [7]. Их использование не устраняет необходимости проведения антикоррозионных мероприятий. Природная нельская вода - мягкая и малощелочная - при параметрах систем теплоснабжения никогда не образует солевых отложений. Но даже если бы был выявлен антикоррозионный эффект в нельской воде (таких испытаний не проводилось) целесообразность их применения в открытых системах оставалась бы под вопросом из-за больших затрат на реагенты. Ориентировочно для типовой системы мощностью 320 МВт было бы необходимо расходовать в год порядка 10 тонн этого ингибитора стоимостью 2-3 млн. рублей.

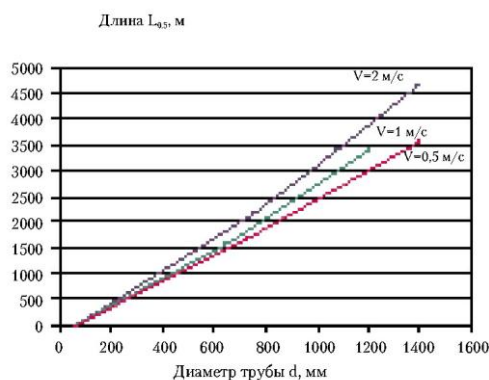


Рис.6 Длина двукратного уменьшения концентрации кислорода в тепловой сети в зависимости от диаметра трубопровода при различных скоростях движения теплоносителя.

Осознавая крайнюю необходимость замедления внутренней кислородной коррозии в системах теплоснабжения, ГУП «ТЭК СПб» и ООО «Колтроникс» в 1993 г. начали исследования совершенно нового типа коррозионного ингибитора - химически инертного коллоидно-углеродного. Наблюдения за поведением кислорода в тепловых сетях показали, что ржавчина не только не препятствует проникновению кислорода к поверхности металла, но, напротив, может создавать новые, вероятно осмотические, механизмы транспорта кислорода к поверхности и отвода от нее продуктов коррозии. Если нарушить действие аномально высоких механизмов подвода кислорода, можно резко снизить общую и, особенно опасную, локальную кислородную коррозию стали.

Первоначально основное внимание было сосредоточено на изучении возможности защитить с помощью коллоидного ингибитора стальные водогрейные котлы, как наиболее подверженный кислородной коррозии и удобный для наблюдений компонент системы теплоснабжения. За восемь лет таких наблюдений за работой более 40 стальных котлов типа ПТВМ-30 и ПТВМ-50 было установлено, что при концентрации ингибитора в сетевой воде 20-50 мкг/кг коррозионный ресурс котлов увеличивается в несколько раз. При нормируемых и умеренно высоких содержаниях кислорода в сетевой воде (до 100-200 мкг/кг) исключается необходимость проведения чисток котлов в течение длительного, ориентировочно 10 лет, периода. При любых возможных концентрациях кислорода гидравлическое сопротивление котлов стабилизируется на уровнях, позволяющих эксплуатировать их в течение всего отопительного сезона.

Оценка коррозионной эффективности коллоидного ингибирования в отношении существующих тепловых сетей объективно затруднена их малой доступностью, разветвленностью, большим коррозионным ресурсом, отличиями в сроках службы различных участков. Кроме того, необходимо учитывать такие факторы как наружная коррозия, электрокоррозия, дефекты в проектировании, в монтаже трубопроводов тепловых сетей, их ремонте и обслуживании.

Тем не менее, восьмилетние наблюдения почти за 20-ю открытыми системами теплоснабжения, работающими с концентрацией ингибитора в сетевой воде 20-50 мкг/кг,

показывают следующее:

1. В течение первого отопительного сезона с коллоидным ингибированием происходит постепенное снижение цветности сетевой воды до уровня цветности подпиточной воды. В дальнейшем качество сетевой воды полностью определяется составом исходной водопроводной воды. В настоящее время в большинстве систем цветность воды не превышает 15 градусов.

2. В течение первых отопительных сезонов в результате ингибирования наблюдается повышение эффективности теплоотдачи домашних систем на 5-10% за счет удаления осадков из отопительных приборов. Отмывка происходит постепенно и не вызывает ухудшения качества сетевой воды.

3. Через несколько лет возникает устойчивая тенденция к стабилизации и затем к снижению повреждаемости сети в среднем на 10-15% в год при ежегодных объемах перекачки 3-5% участков сети. Эта тенденция особенно отчетливо проявляется на фоне наблюдаемого роста повреждаемости сетей сторонних источников, рис.7.

4. Индикаторы коррозии, установленные в сетях с ингибированием, показывают на

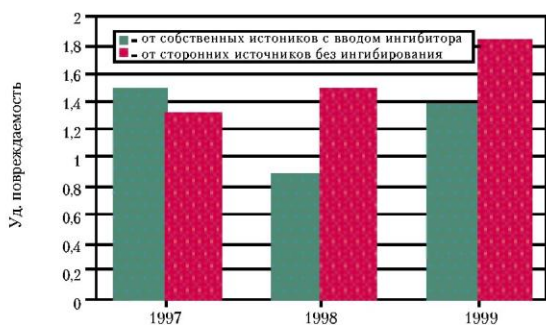


Рис.7. Влияние ингибирования на повреждаемость тепловых сетей, транспортирующих тепло от крупных источников теплоснабжения.

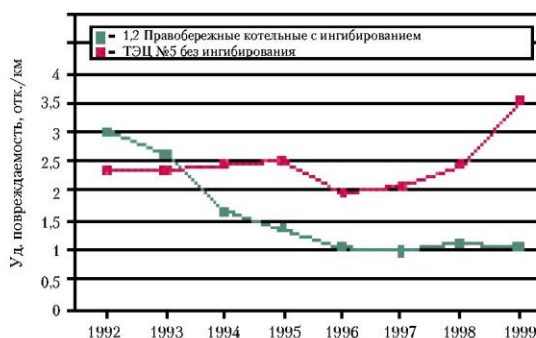


Рис.8. Повреждаемость трубопроводов, транспортирующих тепло от разных источников.

практически полное отсутствие локальной коррозии при любых содержаниях кислорода. Замедление скорости сплошной коррозии при ингибировании начинается через 2-3 месяца. В последующем скорость сплошной коррозии в отопительный период ориентировочно составляет не более 2-3 мкм/год на каждые 10 мкг/кг кислорода в сетевой воде.

5. Необходимо отметить, что работы по вводу ингибитора на первом этапе проводились на 4-х открытых системах теплоснабжения с установленной мощностью котельных 320 МВт, где трубопроводы тепловых сетей имели высокую повреждаемость, а водогрейные котлы ПТВМ-50 часто выходили из рабочего состояния. Только с 1996 г. началось внедрение на остальных наиболее мощных 16 открытых системах теплоснабжения. Для анализа были выбраны относительно сравнимые по мощности и срокам эксплуатации трубопроводов открытые системы теплоснабжения, транспортирующие тепло от разных источников теплоснабжения. Анализ показал, что несмотря на незначительный срок применения ингибирования, рост повреждаемости в трубопроводах отсутствует (рис. 7). В то же время имеется постоянная тенденция роста удельной повреждаемости трубопроводов, транспортирующих тепло от сторонних источников

6. Применение в открытых системах теплоснабжения Невского филиала (в основном ТЭЦ «Ленэнерго») химически инертного коллоидно-углеродного ингибитора привело к снижению удельной повреждаемости трубопроводов, транспортирующих тепло от 1 и 2 Правобережных котельных. В то же время наблюдается непрерывный рост удельной повреждаемости трубопроводов, транспортирующих тепло от ТЭЦ №5 «Ленэнерго», рис. 8. Тепловые сети от всех выше перечисленных источников были построены более 25 лет назад.

Заключение

Создававшиеся в течение многих лет открытые системы теплоснабжения в настоящее время заслуженно подвергаются критике за низкую надежность, большие потери тепла, высокие эксплуатационные и ремонтные затраты. Сложилось убеждение, что возможной единственной альтернативой качественного улучшения теплоснабжения является переход на закрытую схему.

Однако накопленный в ГУП «ТЭК СПб» опыт показывает, что существуют реальные возможности улучшить работу открытых систем. Для этого необходимо наряду с внедрением новых теплогидроизоляционных покрытий трубопроводов сосредоточить усилия на максимально возможном снижении внутренней кислородной коррозии, используя более совершенные методы и приборы контроля кислорода, современное оборудование и технологии антикоррозионной защиты.

Литература

1. Альбертинский Л.И., Липовских В.М. Пути увеличения срока службы тепловых сетей// Энергетик. 1990. №10. С.10.

2. Пакшин А.В., Родичев Л.В. Протяженность и ресурсосбережение при применении теплопроводов в ППУ-изоляции. Информац. бюл. «Теплоэнергоэффективные технологии». Доп. вып. СПб. 1996. С.12.

3. Ромейко В.С. и др. Защита трубопроводов от коррозии// М.: ВНИИМП, 1998.

4. Балабан-Ирменин Ю.В., Липовских В.М., Рубашов А.М. Защита от внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей// М.: Энергоатомиздат. 1999.

5. Скорчелетти В.В. Теоретические основы коррозии металлов// Л.: Химия. 1973.

6. Ньюмен Дж. Электрохимические системы// М.: Мир. 1978.

7. Балабан-Ирменин Ю.В., Рубашов А.М., Думнов В.П. Проблемы внедрения антинакипинов в системах теплоснабжения// Промышленная энергетика. 1996. №4. С.11.