

Corrosion Resistance of Steel Pipelines under Various Thermal Insulation Materials

Zemlyanko A.S., Semenov V.S., Zhukov A.D., Shuvalova E.A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering
Moscow, Russian Federation

Abstract. The durability of insulation systems for pipelines is determined by the operational resistance of the pipeline material and the design of the insulation system. The issue of studying the corrosion processes of steel pipelines under various heat-insulating materials is relevant. The aim of the work was to study the process of corrosion of steel pipelines under insulating materials of various nature and porosity. The object of research is pipeline insulation systems. The subject of research is the corrosion processes in various insulation systems. This goal was achieved by carrying out a set of experimental studies aimed at studying the rate of the corrosion process of the metal of the pipeline, insulated with various materials, with the subsequent calculation of the remaining service life of the pipeline. The most significant results are: the dependence of the corrosion rate and the area of damage of carbon steel on the structure (porosity) of the heat-insulating material, the residual number of ions of water-soluble chlorides. It was found that the maximum corrosion rate of steel under materials with open porosity is 0.29-0.41 mm/year. The increase in the rate of the corrosion process is directly proportional to the increase in the number of chlorine anions in the structure of the material. The smallest area of corrosion damage to the steel surface is observed under materials with open porosity. The significance of the results obtained consists in determining the residual life of the pipeline under a heat-insulating layer of various materials.

Keywords: metal corrosion, corrosion rate, corrosion under insulation, porosity, chlorides, rock wool, pitting corrosion, carbon steel, pipeline insulation.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.2-50.08>

UDC: 691.714 / 699.86

Rezistența la coroziune a conductelor de oțel sub diferite materiale de izolare termică

Zemlianco A.S., Semionov V.S., Jukov A.D., Șuvalova E.A.

Universitatea de construire de stat națională și de cercetare din Moscova
Moscova, Federația Rusă

Rezumat. Scopul lucrării constă în studierea procesului de coroziune a conductelor de oțel de alimentare cu apă caldă sub materiale izolatoare de diferite natură și porozitate. Obiectul cercetării îl constituie sistemele de izolare a conductelor. Subiectul cercetării îl constituie procesele de coroziune ale conductelor de apă caldă din diferite sisteme de izolație. Acest obiectiv a fost atins prin efectuarea unui set de studii experimentale menite să studieze viteza procesului de coroziune a metalului conductei, izolat cu diverse materiale, cu calcularea ulterioară a duratei de viață rămase a conductei. Cele mai semnificative rezultate sunt: dependența vitezei de coroziune și zona de deteriorare a oțelului carbon de structura (porozitatea) materialului termoizolant, numărul rezidual de ioni de cloruri solubile în apă. S-a constatat că viteza maximă de coroziune a oțelului sub materiale cu porozitate deschisă este de 0,29-0,41 mm / an, care este de 1,8-2,7 ori mai mică decât în cazul materialelor cu porozitate închisă. Creșterea ratei procesului de coroziune este direct proporțională cu creșterea numărului de anioni de clor din structura materialului. Cea mai mică zonă de deteriorare a coroziunii la suprafața oțelului se observă la materialele cu porozitate deschisă. Semnificația rezultatelor obținute constă în determinarea duratei de viață reziduală a conductei sub stratul termoizolant din diverse materiale și stabilirea tipurilor de materiale termoizolante, în aplicarea cărora coroziunea sub izolație se desfășoară la cea mai mică rată. Dintre materialele utilizate în sistemele de izolație, cele mai bune rezultate au fost obținute pentru produsele din lână minerală din lână de piatră cu un număr redus de cloruri.

Cuvinte-cheie: coroziune metalică, viteză de coroziune, coroziune sub izolație, porozitate, cloruri, vată de piatră, coroziune cu picături, oțel carbon, izolație a conductelor.

Коррозионная стойкость стальных трубопроводов под различными теплоизоляционными материалами

Землянко А.С., Семенов В.С., Жуков А.Д., Шувалова Е.А.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. Долговечность систем изоляции хозяйственных объектов, в том числе трубопроводов, определяется эксплуатационной стойкостью материала трубопровода и конструкцией изоляционной системы. Известно, что пористость, проницаемость и состав материала изоляционной системы оказывают определенное влияние на коррозионный процесс трубопровода. Коррозия под изоляцией является общепризнанной проблемой. Вопрос исследования коррозионных процессов стальных трубопроводов под различными теплоизоляционными материалами является актуальным. Целью работы явилось исследование процесса коррозии стальных трубопроводов горячего водоснабжения под изоляционными материалами различной природы и пористости. Объект исследования – системы изоляции трубопроводов. Предмет исследования – коррозионные процессы трубопроводов горячего водоснабжения в различных системах изоляции. Поставленная цель достигнута путём проведения комплекса экспериментальных исследований, направленных на изучение скорости коррозионного процесса металла трубопровода, изолированного различными материалами, с последующим расчетом остаточного срока службы трубопровода. Наиболее существенными результатами являются: зависимости скорости коррозии и площади повреждения углеродистой стали от структуры (пористости) теплоизоляционного материала, остаточного числа ионов водорастворимых хлоридов. Установлено, что максимальная скорость коррозии стали под материалами с открытой пористостью составляет 0,29-0,41 мм/год, что в 1,8–2,7 раза ниже, чем под материалами с закрытой пористостью. Увеличение скорости коррозионного процесса прямо пропорционально увеличению числа анионов хлора в структуре материала. Наименьшая площадь коррозионного повреждения поверхности стали наблюдается под материалами с открытой пористостью. Значимость полученных результатов состоит в определении остаточного срока службы трубопровода под теплоизоляционным слоем из различных материалов и установлении типов теплоизоляционных материалов, при применении которых коррозия под изоляцией протекает с наименьшей скоростью. Из применяемых в системах изоляции материалов лучшие результаты получены для минераловолокнистых изделий из каменной ваты с пониженным числом содержания хлоридов.

Ключевые слова: коррозия металла, скорость коррозии, коррозия под изоляцией, пористость, хлориды, каменная вата, питтинговая коррозия, углеродистая сталь, изоляция трубопроводов.

I. ВВЕДЕНИЕ

Системы изоляции наземных трубопроводов и, в частности трубопроводов теплоснабжения, нефтегазовой, химической, сельскохозяйственной и др. отраслей являются необходимым фактором теплосбережения и доставки тепла или энергоносителей к потребителю. В современных условиях, для которых характерна доставка энергоносителей на большие расстояния, сокращение потерь при доставке является более чем актуальной задачей. В середине второй половины XX века на Всемирном саммите ООН в Рио-де-Жанейро была принята концепция дальнейшего «устойчивого развития» мировой цивилизации, базирующейся на решении проблем ресурсо-, энергосбережения и защиты окружающей среды. Во многих странах, включая РФ, были приняты общие и отраслевые программы обеспечения «устойчивого развития» [1–3].

В системах изоляции трубопроводов применяют теплоизоляционные изделия на основе минеральных волокон, а также

материалы ячеистой структуры. На основе каменного и стеклянного волокна для изоляции трубопроводов производят прошивные или непрошивные маты, полуцилиндры, цилиндры или сегменты. Системы с применением таких материалов широко применяют при надземной прокладке трубопроводов с температурой перекачиваемого агента от -30 до +300...+600°C [4, 5]. Изделия на основе минеральных волокон являются наиболее применимыми [6–8].

Ячеистые материалы подразделяют на три большие группы: минеральные, органоминеральные и органические. К минеральным относят изделия на основе пеностекла, известково-кремнеземистые плиты, а также изделия на основе легких бетонов.

Органические материалы представлены газонаполненными пластмассами. Для изоляции трубопроводов применяют изделия на основе экструзионного пенополистирола, пенополиизоцианурата (полуцилиндры, скорлупы), пенополиэтилена и

пенополипропилена (цилиндры, маты), пенополиуретана (штучные изделия или бесканальная прокладка трубопроводов), а также трубки и маты из вспененного каучука.

Материалы каждой из рассмотренных групп имеют свои достоинства и особенности, знание которых позволяет правильно использовать эти материалы и избегать ошибок при проектировании и монтаже конструкций.

Например, большинство из применяемых вспененных пластмасс относят к группе горючих материалов с ограниченной температурой применения, а большинство минеральных изделий являются негорючими и температуростойкими.

С другой стороны, материалы ячеистой структуры имеют закрытую пористость, а соответственно низкие показатели воздухо- и паропроницаемости, а также водопоглощения, а материалы волокнистой структуры – высокую проницаемость.

Необходимость повышения тепловой эффективности современных систем изоляции не вызывает сомнений, но этот показатель является не единственным при оценке энергетической эффективности реализуемых системных решений.

Важным критерием оценки является общая долговечность системы изоляции, а также сохранение ее свойств в процессе эксплуатации в течение всего периода между ремонтами.

Долговечность и стабильность свойств системы изоляции определяются следующим параметрами:

- эксплуатационной стойкостью материала как таковой и в конкретных условиях применения, которая определяется типом применяемых изделий;

- квалифицированным исполнением проекта изоляционной системы и корректностью ее монтажа. Например, отсутствие изоляции на стыках приводит как к потерям тепла через технологический мостик холода, так и опережающим разрушением изоляционных слоев на стыке с последующим отказом всей системы;

- интенсивностью деструктивных процессов, протекающих как в слоях изоляции, так и в металле трубопроводов в результате процессов коррозии различного типа (электрохимической, химической и пр.).

В процессе эксплуатации технологические трубопроводы подвергаются ряду

механических и атмосферных воздействий, что влечёт возникновение различных дефектов и повреждений, снижающих их нормативный срок службы. Одним из важных факторов влияния на коррозию под изоляцией является выделение химически активных анионов хлора и фтора из теплоизоляционного материала при его попеременном увлажнении и нагревании. Растворенные анионы водорастворимых хлоридов и фторидов повышают электропроводность воды, увеличивая скорость коррозионного процесса [9–11].

Микробиологической коррозии подвергаются металлы и сплавы. Коррозионно-агрессивным действием обладают мицелиальные грибы, железобактерии, тионовые и сульфатвосстанавливающие бактерии, способные существовать как в аэробных, так и анаэробных условиях. Особенностью микробиологической коррозии является одновременное протекание электрохимического коррозионного процесса и биохимических процессов, обусловленных физиологией микроорганизмов [12–14].

Факт наличия коррозии под изоляцией (далее – КПИ) определяется путём вскрытия теплоизоляции трубопроводов в результате инженерно-технического обследования или проведения текущих и плановых ремонтных работ. Наличие коррозии под изоляцией влечёт необходимость внепланового ремонта, при этом сумма потерь может достигать миллиарды долларов в год [15–17].

В последние годы мировое научное сообщество уделяет большое внимание изучению процессов прямого взаимодействия теплоизоляционных материалов с материалом защищаемого объекта. Проведён ряд исследований, направленный на выявление факторов, влияющих на скорость протекания коррозии углеродистой стали под теплоизоляционными материалами различных типов. Определено, что одними из наиболее значимых факторов являются пористость теплоизоляционных материалов и уровень водорастворимых хлоридов [18–20].

Поверхностный изоляционный слой оборудования - важная составляющая защиты его конструктивного материала (чаще всего – это сталь) от неблагоприятных воздействий окружающей среды. Зарубежные коллеги приводят пример, когда деталь из аустенитной нержавеющей стали без

надлежащего покровного слоя после воздействия высоких температур имела низкий показатель коррозионной стойкости металла [21].

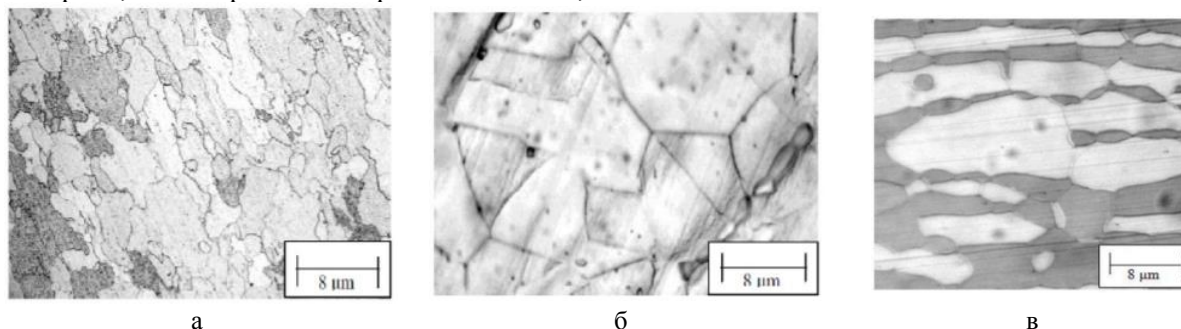
Снижение скорости коррозии под изоляцией при эксплуатации наземных трубопроводов, выполненных из различных видов стали, является актуальной проблемой для промышленных отраслей и ЖКХ, требующей больших капиталовложений. Коррозией под изоляцией называют процесс внешней коррозии трубопроводов и аппаратов, изготовленных из различных видов сталей, протекающий под слоем наружной тепловой изоляции в результате воздействия воды, и атмосферных газов [26].

Коррозия под изоляцией является общепризнанной проблемой уже более 60 лет. В 2003 году ExxonMobil было проведено исследование денежных затрат на техническое обслуживание трубопроводов. Оно показало, что 40 – 60% затрат связано ремонтными работами в результате возникновения КПИ [22].

Большинство специалистов выделяют 5 факторов коррозии под изоляцией для трубопровода [23]: теплоизоляционный материал; материал покровного слоя;

металлический материал крепления покровного слоя; состав атмосферы или окружающей среды; ошибки в проектировании покровного слоя трубопровода.

Часто встречаемыми стальными материалами в промышленности являются углеродистая сталь, аустенитная нержавеющая сталь и дуплексная нержавеющая сталь. Все три типа сталей имеют различную структуру. На рисунке 1 показаны типичные микроструктуры углеродистой стали, нержавеющей стали 316L и дуплексной нержавеющей стали SAF 2205. Все эти стали различаются по микроструктуре, и, следовательно, они показывают разные механические и электрохимические реакции на коррозию, особенно на КПИ. Так, например, для углеродистой стали КПИ может проявляться как в общей, так и в локальной коррозии, для аустенитных и дуплексных нержавеющих сталей коррозия проявляется в виде точечной коррозии и коррозионного растрескивания под напряжением.



а - углеродистая сталь, б - нержавеющая сталь 316L, в - дуплексная нержавеющая сталь 2205.

Рис. 1. Структура различных типов стали.¹

В таблице 1 приведены критические диапазоны температур для этих материалов. Однако, следует отметить, что температурная зона отсечки для КПИ составляет 48...93°C, практически, независимо от материала стали.

Атмосфера окружающей среды является важным фактором коррозии под изоляцией. Основная причина КПИ – это вода, которая позже накапливается или конденсируется под изоляцией, обеспечивая электролит для активного развития электрохимической коррозии.

Источниками внешней воды могут быть: природные (осадки, брызги морской воды, грунтовые воды); промышленные (конденсат).

Коррозионные вещества (хлориды и сульфаты), если производство находится рядом с морской или прибрежной средой, в большом количестве содержатся в соленой воде. Иностранные источники содержат примеры разрушения трубопровода из нержавеющей стали из-за коррозионного растрескивания под действием хлоридов, вызванного их выщелачиванием из теплоизоляции (стекловаты) [25–30].

¹ Appendix 1

Таблица 1².

Критические диапазоны температур для углеродистой стали, аустенитной нержавеющей стали и дуплексной нержавеющей стали при КПИ³ [24].

Материал (Material)	Критический диапазон температур (Critical temperature range)
Углеродистая сталь (Carbon steel)	от -4°C до +175°C, чаще всего 93°C (from -4°C to +175°C, most often 93°C)
Аустенитная и дуплексная нержавеющая сталь (Austenitic and Duplex Stainless Steel)	от +50 до +175°C (from +50°C to +175°C)

Один из факторов коррозии – «ошибки при проектировании трубопроводов» следует понимать с точки зрения герметичности покровного слоя трубопровода. Реальный пример данной ошибки можно рассмотреть на

рисунке 2, где после 8 лет работы трубопровода в прибрежной промышленной атмосфере из-за проникновения воды КПИ привела к усиленному разрушению оборудования.



Рис. 2. Разрушение цинкового покрытия оборудования в следствии КПИ. ⁴

Целью работы явилось исследование процесса коррозии трубопроводов горячего водоснабжения под изоляционными материалами различной природы и пористости. В том числе были решены частные задачи – оценка влияния типа пористости теплоизоляционного материала и остаточного числа ионов водорастворимых хлоридов, входящих в его химический состав на процессы коррозии; определение остаточного срока службы трубопровода из углеродистой стали под различными теплоизоляционными материалами при наличии критических значений глубины питтинговой коррозии. Объект исследования

– системы изоляции трубопроводов. Предмет исследования – коррозионные процессы трубопроводов горячего водоснабжения в различных системах изоляции.

Отличие проводимых исследований от ранее опубликованных работ состоит в установлении зависимости скорости коррозии углеродистой стали от структуры (пористости) теплоизоляционного материала, остаточного числа ионов водорастворимых хлоридов, установлении видов теплоизоляции, обеспечивающих максимальную сохранность трубопроводов.

II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для углеродистой стали наиболее характерно возникновение локальной коррозии – питтинговой или язвенной. Скорость протекания процесса зависит от

особенностей структуры металла и условий эксплуатации. Основной причиной подверженности углеродистых сталей возникновению локальной коррозии является фазовая неоднородность состава металла: наличие различных структурно-фазовых

составляющих, неметаллических включений, дефектов структуры в виде микропор и микротрещин.

Наряду с локальной по поверхности трубопроводов, также встречается и сплошная коррозия, одной из причин возникновения которой служит использование изоляционных материалов с закрытой пористостью. Опасность возникновения коррозионного повреждения инженерных сетей связана с потерей сечения трубопровода, что определяет его безопасную эксплуатацию и срок службы.

Возможность коррозионного воздействия теплоизоляционного материала или входящих в его состав химических веществ на металлические поверхности трубопроводов в присутствии влаги необходимо учитывать на стадии проектирования, а также указывать требования в техническом задании на проектирование по ограничению содержания в теплоизоляционном материале водорастворимых хлоридов, фторидов, свободных щелочей и pH материала. Согласно с требованиями немецкого стандарта AGI Q-132 содержание ионов хлоридов в теплоизоляционном материале должно быть не более 10 мг/кг.

При проведении экспериментальных исследований было рассмотрено 9 теплоизоляционных материалов с различной пористой структурой: аэрогель, пенополиизоцианурат (PIR), цилиндры из каменной ваты с ненормированным (обычным) содержанием хлоридов, цилиндры из каменной ваты с пониженным содержанием хлоридов, стекловата, базальтовое супертонкое волокно (БСТВ), пеностекло, синтетический каучук и пенополиуретан. По типу пористости материалы из каменной и стеклянной ваты и базальтового волокна относят к материалам с открытой пористостью, изделия из пенополиуретана, пеностекла, пенокаучука и пенополиизоцианурата – к материалам с замкнутой пористостью; аэрогель занимает промежуточное положение (частично замкнутая пористость). Гидрофобизатор вводили в состав изделий на основе каменной и стеклянной ваты.

Марка стали для исследуемых образцов соответствует марки стали эксплуатируемых промышленных трубопроводов – А106 и Ст.20 (ГОСТ 1050-2013).

Испытания были основаны на принципе моделирования агрессивной среды для максимальной скорости коррозионного процесса стали марки Ст.20 под теплоизоляцией. Испытания проводились на специальной установке согласно стандарту ASTM G189-07.

Испытания проводились в течение 21 суток с попеременным смачиванием (при температуре 60°C) и высушиванием (при температуре 150 °C различных типов теплоизоляционных материалов). Для попеременного высушивания материала использовался нагреватель. Для равномерного нагрева поверхности труба заполнялась масляным теплоносителем.

Отдельно определялось остаточное число ионов водорастворимых хлоридов. В соответствии с методикой образцы кипятили в деионизированной воде в течение 30 минут для выщелачивания растворимых ионов. Испытания по определению содержания ионов водорастворимых хлоридов проводили, используя кратные аликвоты фильтрованной водной вытяжки.

Для каждого образца использовалась свежая аликвота отфильтрованного раствора. При появлении разногласий использовалась методика ионно-хроматографического (ИХ) анализа. Воспроизводимость результатов рассчитывалась как стандартное отклонение от результатов десяти испытаний, проведенных для одного и того же выщелачивающего раствора. Стандартное отклонение не должно превышать 0,5 мг/кг для концентраций меньше 8,3 мг/кг и должно быть менее 6% среднеарифметического значения десяти результатов испытаний при концентрациях, равных или превышающих 8,3 мг/кг. Скорость коррозии определялась на основании потери массы образцов по следующей формуле:

$$V_{кор} = (K \cdot M) / (A \cdot T \cdot D), \quad (1)$$

где K – константа равная $8,76 \times 10^4$, мм/год; M – потеря массы стального кольца, г; A – площадь поверхности стального кольца, см²; T – время воздействия, ч; D – плотность стального кольца, г/см³.

При определении срока службы трубопровода был принят метод расчёта остаточного срока службы трубопровода при

наличии питтинговой коррозии стали по следующей формуле:

$$t_{ост} = (h_{деф} - h_{мп}) / v_{кор}, \quad (2)$$

где $h_{деф}$ — критическая глубина дефекта при действующем уровне напряжений, мм; $h_{мп}$ — глубина дефекта в зоне максимальных повреждений, мм; $v_{кор}$ — максимальная скорость коррозии, мм/год.

$$h_{деф} = h_0 - d_i \cdot (0,19 \cdot P_\phi / \sigma_{max})^{0,5}, \quad (3)$$

где d_i — наибольший размер коррозионной язвы по верхней кромке, мм; $\sigma_{max} = 0,75\sigma_m$

– предел текучести, МПа; P_ϕ – фактическое внутреннее давление в трубе, МПа; h_0 – толщина стенки в начале эксплуатации, мм.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведённых циклических коррозионных испытаний была установлена зависимость скорости коррозии и площади повреждения углеродистой стали от структуры теплоизоляционного материала (его пористости) и остаточного числа ионов водорастворимых хлоридов. Обобщённые результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2⁵.

Результаты испытаний по определению влияния пористости утеплителя и уровня водорастворимых хлоридов.⁶

Материал (Material)	Наименование показателя (Indicator)			
	Вид пористости (Porosity type)	Остаточное число ионов водорастворимых хлоридов Cl ⁻ , мг/кг (The residual number of ions of water-soluble chlorides Cl ⁻ , mg/kg)	Скорость коррозии, мм/год (Corrosion rate, mm/year)	Максимальная скорость коррозии, мм/год (Maximum corrosion rate, mm/year)
Аэрогельное покрытие (Aergel coating)	Полузакрытая (Half-closed)	0,2	0,5	1,9
Пенополиизоцианурат (Polyisocyanurate foam)	Замкнутая (Closed)	6,9	0,45	1,8
Каменная вата с пониженным содержанием хлоридов (Reduced chloride rock wool)	Открытая (Open)	3,4	0,23	0,29
Каменная вата (Rock wool)	Открытая (Open)	17,6	0,27	0,36
Стекловата (Glass wool)	Открытая (Open)	21,5	0,32	0,41
Базальтовое супертонкое волокно (Basalt super thin fiber)	Открытая (Open)	6,0	0,3	0,33
Пеностекло (Foam glass)	Закрытая (Closed)	0	0,42	0,53
Синтетический каучук (Synthetic rubber)	Закрытая (Closed)	30,1	0,52	0,67
Пенополиуретан (Polyurethane foam)	Закрытая (Closed)	1,1	0,75	0,78

Установлено, что независимо от вида теплоизоляции и характера её пористости коррозия происходит под всеми исследуемыми теплоизоляционными материалами. В зависимости от вида изоляции скорость коррозии углеродистой стали под образцами теплоизоляционных

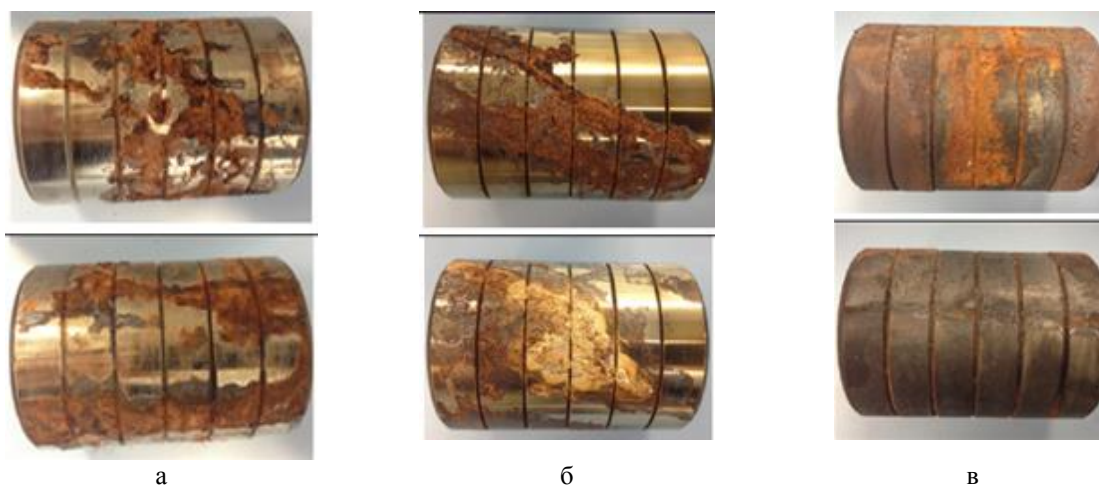
материалов с открытой пористостью протекает медленнее, чем под образцами с закрытой пористостью за счёт лучшей диффузии водяного пара. При этом максимальная скорость для материалов с открытой и закрытой пористостью составляет 0,41 и 1,8 мм/год соответственно.

При сравнении материалов с открытой пористостью можно отметить, что на скорость коррозии влияет выделение активных ионов водорастворимых хлоридов из теплоизоляционного материала при его увлажнении и нагревании. Каменная вата с пониженным содержанием хлоридов имеет минимальные показатели скорости коррозии за счёт низкого количества остаточного числа ионов водорастворимых хлоридов. Сравнение изоляции на основе БСТВ и каменной ваты с пониженным содержанием хлоридов показывает, что применение гидрофобизаторов также влияет на скорость коррозии под изоляцией.

Повышение максимальной скорости коррозии наблюдается под материалами с закрытой пористостью. Это связано с определёнными трудностями по удалению

накопившейся воды под теплоизоляционным слоем и низким уровнем диффузии водяного пара. Под материалами с открытой пористостью максимальная скорость коррозии не превышает 0,41 мм/год, при этом наименьшие значения 0,29-0,36 мм/год наблюдаются у группы материалов из каменной ваты.

Среди рассмотренных материалов с открытой пористостью наименьшие значения максимальной скорости коррозии соответствуют минимальному числу анионов хлора в структуре материала. Стоит отметить, что требованиям AGI Q-132 соответствуют только каменная вата с пониженным содержанием хлоридов (3,4 мг/кг) и базальтовое супертонкое волокно (6 мг/кг). При этом максимальная скорость коррозии составляет 0,29-0,33 мм/год соответственно.



а

б

в

а – полузамкнутая, б – открытая, в – замкнутая.

Рис. 3. Коррозионное повреждение углеродистой стали в зависимости от вида пористости применяемого теплоизоляционного материала.⁷

Как видно из рис. 3 коррозионное повреждение протекает под теплоизоляционными материалами любой структуры и носит локальный характер. По причине отсутствия конкретной методики определения площади повреждения поверхности, данная процедура носит ориентировочное визуальное определение. Наименьшая площадь повреждения поверхности наблюдается под материалами с открытой и полузакрытой пористостью и не превышает 40%. Наибольшая площадь повреждения наблюдается под материалами с закрытой пористостью и составляет 90-100% площади поверхности.

Согласно нормативной документации продления срока службы трубопроводов,

максимально допустимые коррозионные повреждения соответствуют глубине не более 2,5 мм. Таким образом, при расчёте трубы с маркой стали Ст.20 с наружным диаметром $D=219$ мм, внутренним давлением 1,2 МПа и толщиной стенки в начале эксплуатации $h_0=6$ мм, максимальная толщина стенки трубы в зоне наибольших коррозионных повреждений должна быть не менее $h_r=3,5$ мм.

Остаточный срок службы трубопровода из углеродистой стали при критической глубине питтинговой коррозии трубопровода равной $h_{деф}=5,87$ мм под теплоизоляционным слоем из различных материалов составляет для каменной ваты с пониженным содержанием хлоридов – не менее 11 лет; для БСТВ – не

менее 10 лет; для остальных материалов – менее 10 лет.

Анализируя полученные результаты расчётов можно сделать вывод, что остаточный срок службы трубопровода из углеродистой стали при использовании теплоизоляции с открытой пористостью в 1,8-2,7 раз выше, чем при использовании материалов с закрытой и полужакрытой пористостью. При этом наибольший остаточный срок службы относится к каменной вате с пониженным содержанием хлоридов и составляет 11 лет.

Следует отметить, что расчёт остаточного срока службы трубопровода выполнен без учета дополнительных факторов таких, как: воздействие на внутреннюю стенку трубы внутренней коррозии, дополнительных предельных напряжений. Все значения, кроме скорости коррозии, были приняты по усредненным методическим показателям.

IV. ВЫВОДЫ

1. Скорость электрохимической коррозии трубопроводов из углеродистой стали под изоляцией зависит от характера пористости применяемого теплоизоляционного материала, остаточного числа ионов водорастворимых хлоридов в структуре материала, применения гидрофобизаторов в структуре материала.

2. В зависимости от вида теплоизоляции максимальная скорость коррозии под материалами с открытой пористостью составляет 0,29...0,41 мм/год, и за счет лучшей диффузии водного пара наименьшая площадь коррозионного повреждения поверхности углеродистой стали наблюдается у материалов с открытой и полужакрытой пористостью и не превышает 40%. Увеличение скорости коррозионного повреждения углеродистой стали прямо пропорционально содержанию остаточного числа ионов водорастворимых хлоридов в структуре теплоизоляционного материала.

3. Среди рассмотренных теплоизоляционных материалов с открытой пористостью требованиям AGI Q-132 соответствуют каменная вата с пониженным содержанием хлоридов (3,4 мг/кг) и базальтовое супертонкое волокно (6 мг/кг). При этом максимальная скорость коррозии составляет 0,29-0,33 мм/год соответственно.

4. Расчёты остаточного срока службы трубопровода из углеродистой стали при критической глубине питтинговой коррозии равной

$h_{\text{деф}}=5,87$ мм показали, что наибольший остаточный срок службы относится к каменной вате с пониженным содержанием хлоридов и составляет 11 лет.

5. При выборе теплоизоляционного материала для наземных трубопроводов из углеродистой стали необходимо учитывать не только его стандартные свойства (теплопроводность, максимальная температура эксплуатации), но и такие характеристики, как пористость материала, а также его химический состав.

6. Вопрос разработки методов и технологических приемов по уменьшению коррозии под изоляцией остается открытым и является материалом для дальнейшего проведения научно-исследовательских работ.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** Structure of different types of steel. (1 - carbon steel, 2 - 316L stainless steel, 3 - duplex 2205 stainless steel).

^{2,3}**Table 1.** Critical Temperature Ranges for Carbon Steel, Austenitic Stainless Steel, and Duplex Stainless Steel at CUI.

⁴**Fig. 2.** Destruction of the zinc coating of equipment as a result of CUI.

^{5,6}**Table 2.** Test results to determine the effect of insulation porosity and the level of water-soluble chlorides.

⁷**Fig. 3.** Corrosion damage to carbon steel, depending on the type of porosity of the used insulating material. (1 - half-closed, 2 – open, 3 – closed).

Литература (References)

- [1] Dos Santos Gerson Henrique, Mendes Nathan. Combined head, air and moisture (HAM) transfer model for porous building materials // *Journal of building physics*. Vol. 32. №3. 2009, p. 203-220. DOI: 10.1177/1744259108098340.
- [2] Gutnikov S.I., Pavlov YU.V., Popov S.S. Issledovaniye vliyaniya teploizolyatsionnykh materialov na korrozionnyuyu stoykost' metallov [Investigation of the effect of heat-insulating materials on the corrosion resistance of metals] // *Territoriya «NEFTEGAZ» - Territory "NEFTEGAZ"*, 2019, no 12, pp. 56-62. (In Russian).
- [3] Peng D., Hu S., Zhang P., and Wang H. Influence of strain rates on stress corrosion cracking behaviors of welded 304L stainless steel. Harbin Gongcheng Daxue Xuebao/Journal of Harbin Engineering University, 2016, vol. 37, no. 3, pp. 394–401.
- [4] Rakhimov R.Z., Shelikhov N.S., Smirnova T.V. *Teploizolyatsiya iz kamennoy va-ty: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Thermal insulation from stone wa-you: a textbook for universities]. Moscow, 2018. 335 p. (In Russian).

- [5] Mamontov A.A., Yartsev V.P., Strulev S.A. Analiz vlazhnosti razlichnykh utepliteley v ograzhdayushchikh konstruksiyakh zdaniya pri ekspluatatsii v otopitel'nyy period [Analysis of the moisture content of various heaters in the building envelope during operation during the heating season] // *Stroitel'nyye nauki - Construction Sciences*, 2013, no 4, pp.117-119. (In Russian).
- [6] Liu Y., Chen W., Liu M. The effect of foaming temperature on the foam glass by using waste glass // *Gongneng Cailiao*. 2016. T. 47. № 2. P. 135–138.
- [7] Shelikhov N.S., Rakhimov R.Z., Zareznov D.A., Sagdiyev R.R. Sovremennoye sostoyaniye proizvodstva i primeneniya penostekla dlya teplovy izolyatsii [The current state of the production and use of foam glass for thermal insulation] // *Izvestiya KGASU - Izvestia KGASU*, 2018, no 4 (46), pp. 319-325. (In Russian).
- [8] Shubin I.L., Umnyakova N.P., Bessonov I.V., Spiridonov A.V. Perspektivy primeneniya materialov i izdeliy iz penostekla v sistemakh teplovy izolyatsii [Prospects for the use of materials and products from foam glass in thermal insulation systems] // *Byulleten' stroitel'noy tekhniki (BST) - Construction Machinery Bulletin (BST)*, 2017, no 6, pp.12-14. (In Russian).
- [9] Reformatskaya I.I., Podobayev A.N., Artamonov O.YU., Chibysheva V.D. Elektrokhimicheskikh shum kak kharakteristika sklonnosti uglerodistykh staley k pittingovoy i yazvennoy korrozii [Electrochemical noise as a characteristic of the propensity of carbon steels to pitting and pitting corrosion] // *Vestnik TGU - TSU Bulletin*, 2013, Vol.18. no. 5. 2318 p. (In Russian).
- [10] Caines, S., Khan, F., Shirokoff, J., Qiu, W. Experimental design to study corrosion under insulation in harsh marine environments. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015, vol. 33, pp. 39-51.
- [11] Eguchi Kenichiro, Burnett Timothy L, Engelberg Dirk L. X-Ray tomographic characterisation of pitting corrosion in lean duplex stainless steel. *Corrosion Science*, 2020, vol. 165.
- [12] Sokolova T.S. Vliyaniye tionovykh bakteriy na korroziyu stali [Effect of thionic bacteria on steel corrosion] // *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Seriya «Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya» - Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Series "Chemical technology and biotechnology"*, 2017, no 2. pp. 7–18. (In Russian).
- [13] Yerofeyeva T.V., Smirnova V.F. *Mikrobiologicheskoye razrusheniye materialov* [Microbiological destruction of materials]. Moscow, 2008. 128 p. (In Russian).
- [14] Vatsurina A.V., Yesikova T.Z., Kholodenko V.P., Vaynshteyn M.B., Dubkova V.I. Korroziya ob-raztsov truboprovodnoy stali i sopryazhennaya transformatsiya sernykh soyedineniy tionovymi Halothiobacillus neapolitanus DSM 15147 [Corrosion of pipeline steel samples and conjugate transformation of sulfur compounds by thionic Halothiobacillus neapolitanus DSM 15147] // *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya - Applied Biochemistry and Microbiology*, 2005 – Vol.41, no 5, pp. 564–567. (In Russian).
- [15] Hao Fu, Wei Wang, Haoyang Zhao, Feng Jin, Jinxu Li. Study of hydrogen-induced de-layed fracture in high-Mn TWIP/TRIP steels during in situ electrochemical hydrogen-charging: Role of microstructure and strain rate in crack initiation and propagation. *Corrosion Science*, 2020, vol. 162.
- [16] Reformatskaya I.I. Vliyaniye strukturoobrazuyushchikh faktorov na korrozionno-elektrokhimicheskoye povedeniye zheleza i nerzhavayushchikh staley [Influence of structure-forming factors on the corrosion-electrochemical behavior of iron and stainless steels] // *Ros. khim. zh. (Zh. Ros. khim. ob-va im. D.I. Mendeleyeva) - Grew up. chem. g. (J. of the Russian Chemical Society named after D.I.Mendeleev)*, 2008, no 5, pp. 16-24. (In Russian).
- [17] Rizzo Riccardo, Gupta Shivangi, Rogowska Magdalena, Ambat Rajan. Corrosion of carbon steel under CO₂ conditions: Effect of CaCO₃ precipitation on the stability of the FeCO₃ protective layer. *Corrosion Science*, 2020, vol. 162.
- [18] Petrov A.S., Kupriyanov V.N. Vliyaniye temperaturno-vlazhnostnykh usloviy ekspluatatsii stroitel'nykh materialov na ikh paropronitsayemost' [Influence of temperature and humidity conditions of operation of building materials on their vapor permeability] // *Izvestiya KGASU - Izvestia KGASU*, 2015, no 1, pp. 92-98. (In Russian).
- [19] Sabelkin V., Misak H., and Mall S.. Fatigue behavior of Zn-Ni and Cd coated AISI 4340 steel with scribed damage in saltwater environment. *International Journal of Fatigue*, 2016, vol. 90, pp. 158–165.
- [20] Lu H., Du D.-H., Chen K., and Zhang L.-F. Effect of chloride ion on stress corrosion crack growth rate of 316L stainless steel in high temperature pure water. *Yuanzineng Kexue Jishu/Atomic Energy Science and Technology*, 2015, vol. 49, no. 10, pp. 1849–1854.
- [21] Kim M.T., Oh O.Y., and Chang S.Y. Analysis of degradation of a super-austenitic stainless steel for flue gas desulfurization system after a fire accident, *Engineering Failure Analysis* 15 (2008) 575– 581.
- [22] Vogelaere F.D. *Corrosion Under Insulation, Process Safety Progress* Published on behalf of the American Institute of Chemical Engineers by Wiley Inter Science, DOI 10.1002/prs, 28(1) (2009). pp.30-35.

- [23] Reza Javaherdashti. Corrosion under insulation (CUI): A review of essential knowledge and practice, International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering · January 2014.
- [24] Standard Practice. Control of corrosion under thermal insulation and fireproofing materials- A system's Approach", NACE SP 0198-2010, NACE International, TX, USA, 2010.
- [25] Kumar M.S., Sujata M., Venkataswamy M.A., and Bhaumik S.K. Failure analysis of a stainless-steel pipeline, Engineering Failure Analysis 15 (2008) 497–504.
- [26] Houben J., Fitzgerald B., Winnik S., Chustz K., Surkein M. "Deployment of CUI prevention strategies and TSA implementation in projects"; Corrosion 2012, 2012, USA.
- [27] Cao Q., Esmaily M., Liu R., Birbilis N., Thomas S. "Corrosion of mild steel under insulation – the effect of dissolved metal ions", Corrosion Engineering, Science and Technology, p. 1, 2020.
- [28] Eltai E., Musharavati F., Mahdi E. "Severity of corrosion under insulation (CUI) to structures and strategies to detect it", Corrosion Reviews, Vol. 0, 2019.
- [29] Lu C, Gao Y, Cui Z, Liu R. Experimental Analysis of Chloride Penetration into Concrete Subjected to Drying-Wetting Cycles. J. Mater. Civil. Eng. 2015;27(12):1–10.
- [30] Zhou Y., Hou D.S., Jiang J.Y., Liu L., She W., and Yu J. "Experimental and molecular dynamics studies on the transport and adsorption of chloride ions in the nano-pores of calcium silicate phase: the influence of calcium to silicate ratios," Microporous and Mesoporous Materials, vol. 255, pp. 23–35, 2018.

Об авторах.



Землянко Анатолий Сергеевич
Магистр строительства. НИУ МГСУ. Область научных интересов: изоляционные материалы и системы.
E-mail: anatoliy.zemlyanko@mail.ru



Жуков Алексей Дмитриевич
Кандидат технических наук. НИУ МГСУ. Область научных интересов: изоляционные материалы и системы.
E-mail: lj211@yandex.ru



Семенов Вячеслав Сергеевич
Кандидат технических наук. НИУ МГСУ. Область научных интересов: полифункциональные строительные композиты.
E-mail: science-isa@yandex.ru



Шувалова Елена Александровна
Старший преподаватель. НИУ МГСУ. Область научных интересов: композитные строительные материалы и изделия.
E-mail: sh.elena@list.ru