

УДК [699.86+662.998-4]:620.193.4

С.И. Гутников¹, e-mail: gutnikov@gmail.com; **Ю.В. Павлов¹**, e-mail: pavlov_@inbox.ru;

С.С. Попов¹, e-mail: nobko32@yandex.ru

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Москва, Россия).

Исследование влияния теплоизоляционных материалов на коррозионную стойкость металлов

В статье представлены результаты исследования влияния разных теплоизоляционных материалов на коррозионную стойкость металлов труб. В рамках исследования было изучено восемь образцов теплоизоляционных материалов: каменная вата с содержанием хлорид-ионов менее 10 ppm, каменная вата с содержанием хлорид-ионов более 10 ppm, стекловата, базальтовое супертонкое волокно, синтетический каучук, пенополиуретан, пеностекло, мат минераловатный. Испытания проводились по методике ASTM G189 «Стандартное руководство по лабораторному моделированию коррозии при изоляции». В ходе работ была сконструирована и изготовлена экспериментальная установка для определения скорости коррозии под изоляцией. В целях изучения воздействия химического состава образцов на процесс коррозии под изоляцией было проведено исследование влияния выделения химически активных анионов из теплоизоляции при ее увлажнении и нагревании. Испытания образцов были проведены по методике, описанной в ГОСТ 32302-2011 (EN 13468:2001) «Изделия теплоизоляционные, применяемые для инженерного оборудования зданий и промышленных установок. Методы определения остаточного количества ионов водорастворимых хлоридов, фторидов, силикатов, натрия и pH». На основании полученных результатов были выявлены основные факторы, способствующие развитию коррозии под изоляцией, и даны рекомендации по уменьшению ее скорости. Было, в частности, установлено, что образцы с открытой пористостью показали меньшую скорость коррозии, чем образцы с закрытой пористостью. Кроме того, исследование показало, что более высокие значения скорости коррозии имеют образцы из стекловаты, каменной ваты с содержанием хлорид-ионов менее 10 ppm и матов прошивных МП-100 по сравнению с образцами из каменной ваты с содержанием хлорид-ионов более 10 ppm. Таким образом, уменьшить скорость развития коррозионных процессов под изоляцией на объектах с температурой теплоносителя более 120 °С можно путем создания отверстий на обкладочном слое изделий в целях удаления лишней влаги.

Ключевые слова: теплоизоляция, коррозия под изоляцией, химический состав, остаточное количество ионов, испытательный стенд, температура теплоносителя.

.....

S.I. Gutnikov¹, e-mail: gutnikov@gmail.com; **Yu.V. Pavlov¹**, e-mail: pavlov_@inbox.ru; **S.S. Popov¹**, e-mail: nobko32@yandex.ru

¹ Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "M.V. Lomonosov Moscow State University" (Moscow, Russia).

Study of the Influence of Heat-Insulating Materials on the Corrosion Resistance of Metals

The article presents the results of a study of the effect of various heat-insulating materials on the corrosion resistance of pipe metals. As part of the study, eight samples of thermal insulation materials were studied: rock wool with a chloride ion content of less than 10 ppm, stone wool with a chloride ion content of more than 10 ppm, glass wool, basalt superthin fiber, synthetic rubber, polyurethane foam, foam glass, mineral wool mat. The tests were conducted according to ASTM G189 "Standard Guide for Laboratory Simulation of Corrosion Under Insulation". During the work, an experimental setup was designed and manufactured to determine the corrosion rate under insulation. To research the effect of the chemical composition of the samples on the corrosion process under insulation, authors of the article studied the effect of the release of chemically active anions from the thermal insulation when it is wetted and heated. Testing of the samples was carried out according to the method described in Interstate Standard (GOST) 32302-2011 (EN 13468: 2001) "Thermal Insulating Products for Building Equipment and Industrial Installations. Methods for Determination of Trace Quantities of Water Soluble Chloride, Fluoride, Silicate, Sodium Ions and pH". Based on the results obtained, the main factors contributing to the development of corrosion under insulation were determined, and recommendations for its reduction were given. In particular, it was found that samples with open porosity showed a lower corrosion rate than samples

with closed porosity. In addition, the study showed that samples of glass wool, rock wool with a chloride ion content of less than 10 ppm and wired mats MP-100 have higher values of corrosion rate compared to samples of rock wool with a chloride ion content of more than 10 ppm. Thus, it is possible to reduce the rate of development of corrosion processes under insulation at objects with a heating agent temperature of more than 120 °C by creating holes on the cover layer of products in order to remove excess moisture.

Keywords: thermal insulation, corrosion under insulation, chemical composition, residual amount of ions, test bench, heating agent temperature.

ВВЕДЕНИЕ

Термин «коррозия под изоляцией» (КПИ) используется для обозначения процессов внешней коррозии трубопроводов и сосудов, изготовленных из различных видов сталей. Процесс КПИ происходит под наружной тепловой или акустической изоляцией главным образом из-за проникновения воды. По своей природе КПИ, как правило, остается незамеченной до тех пор, пока изоляция и оболочка/кожух не будут сняты для проведения профилактических работ или пока не произойдет авария.

Коррозия под изоляцией является серьезной проблемой во всем мире. Явление КПИ не новое и встречается в разных отраслях: в нефтегазовой промышленности (как на суше, так и на море) [1], химической промышленности, энергетике и других смежных отраслях. Профилактические работы, направленные на снижение ущерба, обусловленного КПИ, требуют значительных затрат.

По оценке Всемирной организации коррозии, ежегодно коррозия наносит ущерб, оцениваемый в 2,2 трлн долл. США [2]. Около 45 % всех потерь приходится на нефтегазовую отрасль, в которой 40–60 % всех затрат на ремонт трубопроводов, или 10 % общего объема затрат, связано именно с процессом коррозии под изоляцией.

Вплоть до 1970-х гг. КПИ обычно не рассматривалась как серьезная проблема. В то время трубопроводы, сосуды и оборудование не были изолированы, если рабочая температура не превышала 150 °C. Изолированные стальные поверхности, эксплуатировавшиеся

при более высоких температурах, большую часть времени оставались сухими, поэтому значительного количества случаев коррозии не наблюдалось. Нефтяной кризис в 1970-х гг. привел к росту цен на энергоносители, что обусловило рентабельность использования теплоизоляционных материалов и на объектах с температурой теплоносителя ниже 150 °C. При низких температурах изолированные поверхности чаще смачивались и подвергались коррозии. Системы покрытий, успешно использовавшиеся на неизолированных поверхностях, впоследствии применялись и под изоляцией. Однако они плохо работали в горячей смачиваемой среде, создаваемой под теплоизоляцией при температуре ниже 150 °C, поэтому обозначились проблемы, связанные с КПИ, и со временем их значение возросло. Поначалу тому факту, что горячая водная среда присутствовала под изоляцией (из-за проникновения воды), не придавали особого значения. Но системы того времени, предназначенные для защиты от атмосферной коррозии, не могли адекватно защитить от коррозионных процессов в условиях, по существу, погружения. Коррозия под изоляцией продолжала оставаться незамеченной вплоть до обнаружения протечек или даже разрушения конструкции.

Осознав масштабы проблемы, международные организации по разработке и внедрению стандартов приступили к ее решению. Защита от КПИ стала предметом международного руководства NACE (англ. National Association of Corrosion Engineers – Национальная ассоциация инженеров-коррозионистов),

опубликованного более 10 лет назад и обновленного в 2004 г. [3]. Впрочем, несмотря на очевидный прогресс в данной области, проблема сохранялась, о чем свидетельствует выпуск в 2007 г. руководства ASTM (англ. American Society for Testing and Materials – Американское общество по испытанию материалов) по лабораторным испытаниям для КПИ [4]. Как отмечается в общих положениях документа, в нем рассматривается лабораторное моделирование процессов КПИ. Стандарт требует, чтобы образцы для испытаний были изолированы друг от друга и подвергались воздействию агрессивной среды, в т. ч. повышенной температуры. В стандарте описаны прибор для тестирования в целях обнаружения КПИ, подготовки образца, процедуры моделирования температуры, а также влажные и сухие условия среды, способствующие развитию КПИ. Руководство предназначено главным образом для того, чтобы помочь установить приемлемые подходы к моделированию КПИ применительно к углеродистой или низколегированной трубной стали.

В последние 10 лет теме коррозии под изоляцией посвящалось все больше публикаций. Основным научным форумом, на котором проходило обсуждение проблем КПИ, стала конференция Corrosion (англ. коррозия), проводимая под эгидой NACE. Одним из направлений, вызывающих особый интерес исследователей, стало изучение возможности применения защитных покрытий для предотвращения возникновения ржавчины [5]. Авторы, [6] приводят данные о влиянии водорастворимых

Ссылка для цитирования (for citation):

Гутников С.И., Павлов Ю.В., Попов С.С. Исследование влияния теплоизоляционных материалов на коррозионную стойкость металлов // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2019. № 12. С. 56–62.

Gutnikov S.I., Pavlov Yu.V., Popov S.S. Study of the Influence of Heat-Insulating Materials on the Corrosion Resistance of Metals. Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2019;(12):56–62. (In Russ.)

Таблица 1. Перечень материалов, образцы которых были изучены в рамках исследования

Table 1. The list of materials, which samples were studied

Образец Sample	Тип материала Type of material	Толщина образца, мм Sample thickness, mm
Цилиндр ROCKWOOL 150 Cylinder ROCKWOOL 150	Каменная вата с содержанием Cl ⁻ > 10 ppm Rock wool with content of Cl ⁻ > 10 ppm	50
Цилиндр ProRox PS 960 RU Cylinder ProRox PS 960 RU	Каменная вата с содержанием Cl ⁻ < 10 ppm Rock wool with content of Cl ⁻ < 10 ppm	40
Мат URSA Geo M-11Ф Mat URSA Geo M-11F	Стекловата Glass wool	50
Мат BOS PRO Mat BOS PRO	Базальтовое супертонкое волокно Basalt superthin fiber	60
Вспененный каучук K-Flex ST Foam rubber K-Flex ST	Синтетический каучук Synthetic rubber	50
Скорлупа без облицовки AMARO Pipe covering without coating AMARO	Пенополиуретан Polyurethane foam	50
Скорлупа FOAMGLASS Pipe covering FOAMGLASS	Пеностекло Foam glass	40
Мат прошивной МП-100 по [11] Wired mat MP-100 after [11]	Каменная вата Rock wool	50

Таблица 2. Схема нагрева и увлажнения образцов

Table 2. Scheme of heating and humidification of samples

Параметр Parameter	Один цикл Single cycle		Число циклов Number of cycles
Температура, °C Temperature, °C	60	150	21
Увлажнение Wetting	+	-	
Продолжительность, ч Time length, h	20	4	

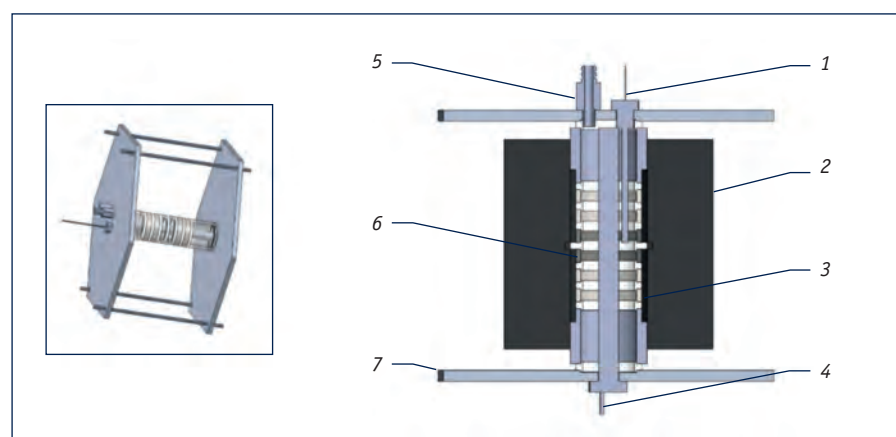


Рис. 1. Схема испытательного стенда для исследования процесса коррозии под изоляцией:

1 – термопара; 2 – образец теплоизоляции из минерального волокна; 3 – тефлоновая вставка; 4 – нагреватель; 5 – кран для подачи теплоносителя; 6 – металлический образец (сталь); 7 – стенка

Fig. 1. Scheme of the test stand for the study of the corrosion process under insulation:

1 – thermocouple; 2 – sample of thermal insulation from mineral fiber; 3 – teflon insert; 4 – heater;

5 – tap for supplying heating agent; 6 – metal sample (steel); 7 – wall

хлоридов на поверхность нержавеющей стали.

В последние годы исследователи уделяют больше внимания процессу прямого взаимодействия теплоизоляционных материалов и конструкций с материалом защищаемых объектов [7, 8]. Однако в России, несмотря на наличие характерных проблем с КПИ, общих для промышленности всего мира, до сих пор отсутствует нормативный документ, регламентирующий защиту от коррозии под изоляцией.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является исследование разных видов теплоизоляционных материалов согласно требованиям [4] и изучение теплоизоляции как фактора, способствующего развитию коррозии труб.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика определения коррозии под изоляцией соответствует требованиям [4], в котором описана принципиальная схема исследования КПИ. Так, согласно данному стандарту, установка для проведения исследований должна состоять из шести кольцевых образцов, разделенных непроводящими вставками и скрепленных двумя защитными секциями трубы с глухими фланцами, по одному на каждом конце. Алгоритм проведения испытаний включает в себя изотермическую или циклическую выдержку во влажных или влажных/сухих условиях, моделирующих желаемые условия эксплуатации. Образцы изготавливают из трубы, соответствующей [9], Grade B с проходным диаметром, равным 2 дюймам, и толщиной стенки 0,187 дюйма. Вставки того же диаметра должны быть изготовлены из непористого и непроводящего материала, например политетрафторэтилена (PTFE). Внутри трубы помещают нагреватель мощностью не менее 400 Вт и термопару для регулирования температуры. В целях равномерного распределения температуры на поверхности трубы внутри ее заполняют теплоносителем (маслом).

На собранную таким образом трубу устанавливают теплоизоляционный



05 Декабря
2019

НЕФТЕГАЗШЕЛЬФ

Подряды на нефтегазовом шельфе

Заказчиками оборудования выступают "Газпром нефть", "Роснефть", "ЛУКОЙЛ", "Газфлот" и другие крупные компании. В условиях введения экономических санкций необходимо быстро освоить производство жизненно важного оборудования, в первую очередь запасных частей

- ТЕК-R.RU — Выявление предприятий, способных работать для шельфа по итогам ежегодного опроса нефтегазовых компаний
 ТЕК-ALL.RU — База оборудования для нефтегазового шельфа
 ТЕК-MAP.RU — Настенная нефтегазовая карта



20 Февраля
2020

ИНВЕСТЭНЕРГО

Инвестиционные проекты в электроэнергетике

Обзор инвестиционных проектов и модернизация российской электроэнергетики, вопросы материально-технического обеспечения в отрасли, практика закупочной деятельности в крупнейших российских компаниях

- ТЕК-R.RU — Награждение лучших поставщиков оборудования и услуг в электроэнергетике
 ТЕК-MAP.RU — Настенная карта по электроэнергетике



17 Марта
2020

НЕФТЕГАЗСНАБ

Снабжение в нефтегазовом комплексе

Конференция собирает руководителей служб материально-технического обеспечения нефтегазовых компаний. Обсуждается организация закупочной деятельности, практика импортозамещения, оплата и приемка поставленной продукции, информационное обеспечение рынка

- ТЕК-R.RU — Награждение лучших производителей нефтегазового оборудования по итогам ежегодного опроса нефтегазовых компаний
 ТЕК-ALL.RU — База поставщиков нефтегазового комплекса
 ТЕК-MAP.RU — Настенная нефтегазовая карта



28 Мая
2020

НЕФТЕГАЗСТРОЙ

Строительство в нефтегазовом комплексе

Формирование цивилизованного рынка в нефтегазовом строительстве, практика выбора строительных подрядчиков, создание российских ЕРС-фирм, увеличение доли российских компаний на нефтегазостроительном рынке, расценки и порядок оплаты проводимых работ

- ТЕК-R.RU — Награждение лучших строительных подрядчиков по итогам ежегодного опроса нефтегазовых компаний
 ТЕК-ALL.RU — База поставщиков нефтегазостроительных компаний
 ТЕК-MAP.RU — Настенная нефтегазовая карта



10 Сентября
2020

НЕФТЕГАЗОПЕРЕРАБОТКА

Модернизация производств для переработки нефти и газа

Вопросы модернизации нефтеперерабатывающих и нефтехимических мощностей, проблемы взаимодействия с лицензиарами, практика импортозамещения, современные модели управления инвестиционными проектами, стандарты и требования безопасности

- ТЕК-R.RU — Награждение лучших производителей оборудования для модернизации нефтегазоперерабатывающих предприятий по итогам ежегодного опроса нефтегазовых компаний
 ТЕК-ALL.RU — База подрядчиков для модернизации НПЗ
 ТЕК-MAP.RU — Настенная нефтегазовая карта



29 Октября
2020

НЕФТЕГАЗСЕРВИС

Нефтегазовый сервис в России

Традиционная площадка для встреч руководителей геофизических, буровых предприятий, а также компаний, занятых ремонтом скважин. Подрядчики в неформальной обстановке обсуждают актуальные вопросы со своими заказчиками – нефтегазовыми компаниями

- ТЕК-R.RU — Награждение лучших нефтесервисных компаний по итогам ежегодного опроса нефтегазовых компаний
 ТЕК-ALL.RU — База поставщиков нефтесервисных компаний
 ТЕК-MAP.RU — Настенная нефтегазовая карта

материал, через который при помощи насоса пропускают воду. Скорость потока должна составлять 0,5–5,0 мл/мин. После выдержки образцы отчищают от ржавчины по [10]. Скорость коррозии определяют по потере массы образцов по следующей формуле:

$$v_{\text{корр}} = (K \cdot M) / (A \cdot T \cdot D), \quad (1)$$

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

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОРРОЗИИ ПОД ИЗОЛЯЦИЕЙ

Схема установки для ИЗУЧЕНИЯ коррозии под изоляцией представлена на рис. 1. В установке были использованы кольца из стали марки ст20 (один из ближайших аналогов стали марки A106 Grade B) диаметром 60 мм, шириной 6 мм, с толщиной стенки 4 мм. Между стальными кольцами располагались вставки – тефлоновые кольца диаметром 60 мм, шириной 6 мм. По краям установки использовали защитные секции из стали марки ст20. Полученную таким образом трубу стягивали по краям при помощи стенок. Для удобства и устойчивости стенки были сделаны в форме шестиугольников.

Внутри труб располагались нагреватель мощностью 600 Вт и термopара ТХА. Во внутреннюю часть трубы заливали техническое масло Shell Heat Transfer Oil S2 для равномерного распределения температуры на поверхности трубы. Образец теплоизоляционного материала наматывали или надевали на трубу. Толщина теплоизоляции варьировалась от 40 до 60 мм в зависимости от марки образца (табл. 1). Все образцы сверху покрывали пленкой, в которой проделывали несколько отверстий для выхода воды.

Собранную таким образом ячейку помещали на стенд. Внизу располагалась канистра с дистиллированной водой объемом 5 л. Вода через насос подавалась в резервуар над измерительной ячейкой, а затем в установку через два

отверстия, расположенных на расстоянии 15 мм от края измерительной части ячейки. Диаметр отверстий – 6 мм. Скорость подачи воды составляла 40 мл/ч. В нижней части установки располагались еще два отверстия диаметром 6 мм, через которые вода попадала в резервуар, размещенный внизу.

Нагрев и увлажнение образцов проводили по схеме, представленной в табл. 2.

После выдержки по указанной схеме образцы очищали от ржавчины путем выдержки в течение 30 мин при комнатной температуре в растворе следующего состава: 100 мл HNO₃ + 20 мл HF + 1000 мл H₂O.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2 представлены фотографии поверхности образцов после проведения экспериментов. Для каждого образца проводилась съемка нижней и верхней части.

В табл. 3 приведены результаты испытания максимальной скорости коррозии (мм/год). Площадь поврежденной поверхности оценивали визуально. На основании потери массы образцов скорость коррозии рассчитывали по формуле (1).

Общую скорость коррозии рассчитывали как среднее значение для шести образцов. В табл. 3 также представлено максимальное значение скорости коррозии, измеренное в выборке из шести образцов для каждого материала.

Можно отметить, что основная часть повреждений приходится на нижнюю часть образца, расположенную в диапазоне 4–8 ч. Аналогичная картина разрушения наблюдается в работе, посвященной исследованиям в данной области [8].

Значения полученных скоростей коррозии лежат в интервале от 0,23 мм/год для образца цилиндра ProRox PS 960 RU до 0,75 мм/год для образца пенополиуретана (ППУ). Полученные результаты согласуются с результатами ряда натурных испытаний. Например, в работе [12] представлены результаты натурных испытаний КПИ для разных видов марок сталей. В ходе исследований,

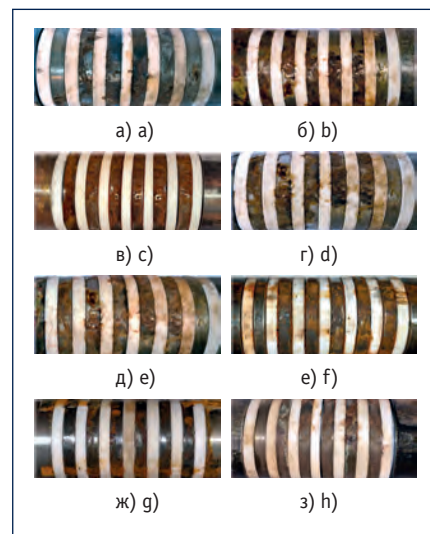


Рис. 2. Фотографии нижней поверхности образцов после эксперимента:

- а) каменная вата с содержанием Cl⁻ < 10 ppm;
- б) каменная вата с содержанием Cl⁻ > 10 ppm;
- в) стекловата; г) базальтовое супертонкое волокно; д) мат прошивной Isotec МП-100;
- е) синтетический каучук; ж) пенополиуретан;
- з) пеностекло

Fig. 2. Photos of the bottom side of the samples after the experiment:

- a) stone wool with a content of Cl⁻ < 10 ppm;
- b) stone wool with a content of Cl⁻ > 10 ppm;
- c) glass wool; d) basalt superthin fiber;
- e) stitched mat Isotec MP-100; f) synthetic rubber;
- g) polyurethane foam; h) foam glass

в частности, было установлено, что скорость коррозии для высокоуглеродистой стали составила 0,7–2,2 мм/год, для дуплексной нержавеющей стали – от 0,5 до 0,6 мм/год.

Снимки, сделанные с помощью электронного микроскопа, показывают, что продукты коррозии имеют характерную для нее морфологию. Во всех образцах коррозия образуется на поверхности исследованных материалов (рис. 3). Исключением является образец ППУ, у которого изменению подверглось почти 100 % площади.

Полученные результаты свидетельствуют о важной роли пористости теплоизоляционного материала для развития процесса КПИ. Значительное разрушение нижней части образцов всех материалов обусловлено тем, что вода скапливалась именно в нижней части образцов. В то же время при исследова-

Таблица 3. Результаты исследования

Table 3. Study results

Образец Sample	Площадь поврежденной поверхности, % Damaged surface area, %	Скорость коррозии, мм/год Corrosion rate, mm/year	Максимальная скорость коррозии, мм/год Maximum corrosion rate, mm/year	Остаточное количество ионов, мг/кг Residual ion count, mg/kg				pH
				Cl ⁻	F ⁻	Na ⁺	SiO ₃ ²⁻	
Цилиндр ROCKWOOL 150 Cylinder ROCKWOOL 150	50	0,27	0,36	17,6	6,7	78,3	987,4	9,4
Цилиндр ProRox PS 960 RU Cylinder ProRox PS 960 RU	50	0,23	0,29	3,4	2,2	29,1	187,9	8,6
Мат URSA Geo M-11Ф Mat URSA Geo M-11F	60	0,32	0,41	21,5	11,2	2045,0	1567,0	9,7
Мат BOS PRO Mat BOS PRO	60	0,30	0,33	6,0	12,2	169,6	1505,5	9,1
Вспененный каучук K-Flex ST Foam rubber K-Flex ST	70	0,52	0,67	30,1	0,0	4,0	24,8	8,6
Скорлупа без облицовки AMARO Pipe covering without coating AMARO	90	0,75	0,78	1,1	0,0	0,0	0,0	7,6
Скорлупа FOAMGLASS Pipe covering FOAMGLASS	70	0,42	0,53	0,0	0,0	94,4	207,0	8,1
Мат прошивной МП-100 по [11] Wired mat MP-100 after [11]	60	0,37	0,53	57,5	26,3	3109,3	2316,2	9,2

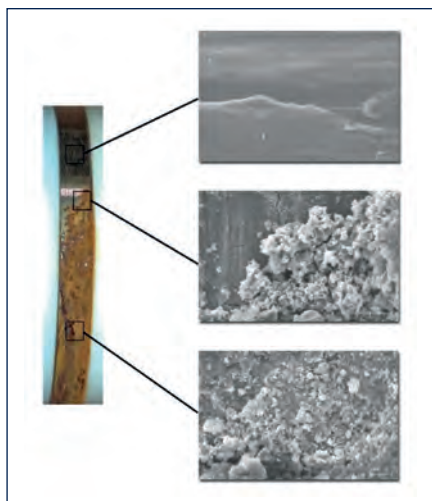


Рис. 3. Изображения сканирующей электронной микроскопии поверхности металла после проведения эксперимента
Fig. 3. Images of scanning electron microscopy of the metal surface after the experiment

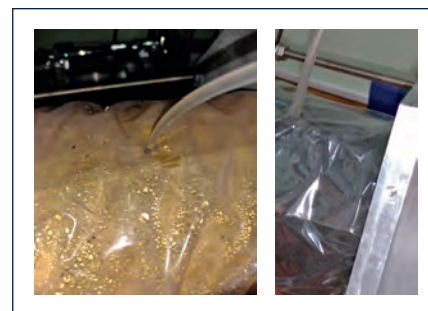
нии образцов с открытой пористостью было отмечено, что вода могла выходить сквозь образец при высокой температуре, что и является одной из основных причин более низких показателей скорости коррозии у образцов волокнистой теплоизоляции.

На рис. 4 видно, что при исследовании образца теплоизоляционного цилиндра на основе минеральной ваты ProRox PS 960 RU вода испарялась и, прохо-

дя сквозь образец, конденсировалась на пленке. В случае образца вспененного каучука такое явление не наблюдалось.

Еще одним важным фактором, во многом определяющим развитие процесса коррозии на поверхности металла, является выделение химически активных анионов из образцов при их увлажнении и нагревании. Для исследования этого фактора в работе все образцы были испытаны по методике, описанной в [13]. Все образцы выдерживали в кипящей воде в течение 30 мин, а затем определяли концентрацию Cl⁻, F⁻, Na⁺ и SiO₃²⁻ и pH. Результаты представлены в табл. 3.

Следует отметить, что данная методика применяется в основном для волокнистых материалов. Образцы с закрытой пористостью не полностью смачивались в ходе эксперимента. В то же время на основании полученных результатов можно сделать вывод, что химический состав теплоизоляционного материала имеет важное значение для развития процесса КПИ. По мнению авторов данной статьи, более высокие значения скорости коррозии для образцов URSA Geo M-11Ф и ROCKWOOL 150 по сравнению с ProRox PS 960 RU могут быть связаны именно с высокой концентрацией хлорид-ионов в водной вытяжке.



а) а) б) б)

Рис. 4. Фото поверхности образцов:
а) ProRox PS 960 Ru; б) синтетический каучук
Fig. 4. Samples surface photo:
а) ProRox PS 960 Ru; б) synthetic rubber

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние разных теплоизоляционных материалов как фактора, обуславливающего развитие коррозии. В ходе исследования на экспериментальной установке были изучены восемь образцов теплоизоляционных материалов: каменная вата с содержанием Cl⁻ > 10 ppm, каменная вата с содержанием Cl⁻ < 10 ppm, стеклянная вата, базальтовое супертонкое волокно, синтетический каучук, пенополиуретан, пеностекло, мат минераловатный МП-100 по [11]. Наименьшее значение скорости коррозии по методике, описанной в [4], показал образец ProRox PS 960 RU – 0,23 мм/год.

На основании полученных результатов были установлены такие основные факторы, оказывающие влияние на процесс развития КПИ, как:

- пористость образца – образцы с открытой пористостью продемонстрировали меньшую скорость коррозии, чем образцы с закрытой пористостью;
- выделение химически активных анионов из теплоизоляции при ее увлажнении и нагревании. Испытания, проведенные по методике, описанной в [13],

показали, что с этим связаны более высокие значения скорости коррозии для образцов из стекловаты, каменной ваты с содержанием $Cl^- > 10$ ppm и матов прошивных МП-100 [11] по сравнению с образцами из каменной ваты с содержанием $Cl^- < 10$ ppm;

- конструкция изделий из теплоизоляционных материалов. На основании полученных результатов для уменьшения скорости развития коррозии под изоляцией для объектов с температурой

теплоносителя выше 120 °С может быть рекомендовано создание отверстий на обкладочном слое изделий в целях удаления лишней влаги;

- отсутствие гидрофобизирующих добавок – более высокие значения скорости коррозии для образцов из базальтового супертонкого волокна (мат BOS PRO) по сравнению с образцами теплоизоляционных цилиндров ROCKWOOL 150 и ProRox PS 960 RU связано с отсутствием таких добавок.

Литература:

1. 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. P. 39–51.
2. Hays G.F. Now is the Time // Advanced Materials Research. 2015. Vol. 95. P. 1–2.
3. RP0198-2004. The Control of Corrosion Under Thermal Insulation and Fireproofing Materials – A System Approach. Houston: NACE, 2004.
4. ASTM G189. Standard Guide for Laboratory Simulation of Corrosion Under Insulation. West Conshohocken: ASTM International, 2007.
5. Waddel D. Measurement of Leachable Chloride Content from Coatings Applied to Stainless Steel [Электронный источник]. Режим доступа: <http://toc.proceedings.com/05119webtoc.pdf> (дата обращения: 20.12.2019).
6. Kane R., Chauviere M., Chustz K. Evaluation of Steel and TSA Coating in a Corrosion Under Insulation (CUI) Environment // Conference papers of the NACE CORROSION 2008. Papers No. 08019.
7. Zwaag C., Rasmussen S.N. Cyclic CUI Testing of Insulation Materials // Conference papers of the NACE CORROSION 2017. Papers No. 08877.
8. Pojtanabuntoeng T. Comparison of Insulation Materials and Their Roles on Corrosion Under Insulation // Conference papers of the NACE CORROSION 2017. Papers No. 09287.
9. ASTM A106 A106M. Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service [Электронный источник]. Режим доступа: <https://thepipefitting.com/pdf/%20ASTM%20A106%20A106M%20Standard%20Specification%20for%20Seamless%20Carbon%20Steel%20Pipe%20for%20High-Temperature%20Service.pdf> (дата обращения: 20.12.2019).
10. ASTM G1. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluation Corrosion Test Specimens [Электронный источник]. Режим доступа: www.cosasco.com/documents/ASTM_G1_Standard_Practice.pdf (дата обращения: 20.12.2019).
11. ГОСТ 21880-2011. Маты из минеральной ваты прошивные теплоизоляционные. Технические условия [Электронный источник]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200088542> (дата обращения: 20.12.2019).
12. McNaughtan D., Najami M. Practical Considerations for Effective Corrosion Under Insulation (CUI) Management from a North Sea Perspective // Conference papers of the NACE CORROSION 2009. Papers No. 09135.
13. ГОСТ 32302-2011 (EN 13468:2001). Изделия теплоизоляционные, применяемые для инженерного оборудования зданий и промышленных установок. Методы определения остаточного количества ионов водорастворимых хлоридов, фторидов, силикатов, натрия и pH [Электронный источник]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200119631> (дата обращения: 20.12.2019).

References:

1. 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;33:39–51.
2. Hays G.F. Now is the Time. Advanced Materials Research. 2015;95:1–2.
3. RP0198-2004. The Control of Corrosion Under Thermal Insulation and Fireproofing Materials – A System Approach. Houston: NACE; 2004.
4. ASTM G189. Standard Guide for Laboratory Simulation of Corrosion Under Insulation. West Conshohocken: ASTM International; 2007.
5. Waddel D. Measurement of Leachable Chloride Content from Coatings Applied to Stainless Steel. Weblog. Available from: <http://toc.proceedings.com/05119webtoc.pdf> [Accessed 20th December 2019].
6. Kane R., Chauviere M., Chustz K. Evaluation of Steel and TSA Coating in a Corrosion Under Insulation (CUI) Environment. Conference papers of the NACE CORROSION 2008. Papers No. 08019.
7. Zwaag C., Rasmussen S.N. Cyclic CUI Testing of Insulation Materials. Conference papers of the NACE CORROSION 2017. Papers No. 08877.
8. Pojtanabuntoeng T. Comparison of Insulation Materials and Their Roles on Corrosion Under Insulation // Conference papers of the NACE CORROSION 2017. Papers No. 09287.
9. ASTM A106 A106M. Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service. Weblog. Available from: <https://thepipefitting.com/pdf/%20ASTM%20A106%20A106M%20Standard%20Specification%20for%20Seamless%20Carbon%20Steel%20Pipe%20for%20High-Temperature%20Service.pdf> [Accessed 20th December 2019].
10. ASTM G1. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluation Corrosion Test Specimens. Weblog. Available from: www.cosasco.com/documents/ASTM_G1_Standard_Practice.pdf [Accessed 20th December 2019].
11. Interstate Standard (GOST) 21880-2011. Thermoinsulating Mineral Wool Broached Mats. Specifications. Weblog. Available from: <http://docs.cntd.ru/document/1200088542> [Accessed 20th December 2019]. (In Russ.)
12. McNaughtan D., Najami M. Practical Considerations for Effective Corrosion Under Insulation (CUI) Management from a North Sea Perspective. Conference papers of the NACE CORROSION 2009. Papers No. 09135.
13. Interstate Standard (GOST) 32302-2011 (EN 13468:2001). Thermal Insulating Products for Building Equipment and Industrial Installations. Methods for Determination of Trace Quantities of Water Soluble Chloride, Fluoride, Silicate, Sodium Ions and pH. Weblog. Available from: <http://docs.cntd.ru/document/1200119631> [Accessed 20th December 2019]. (In Russ.)