

УДК 620.193

В. С. Францкевич¹, А. В. Поспелов¹, Д. А. Костюковец²
¹Белорусский государственный технологический университет
²ООО «УМКА»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКА И МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ КОРРОЗИИ ТРУБОК ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ЩЕЛОКА В ПРОИЗВОДСТВЕ KCl

Коррозия технологического оборудования, инженерных сетей и сооружений является очень серьезной проблемой для промышленных предприятий. Объектом исследований был выбран, подогреватель щелока в производстве калийных удобрений галургическим способом. Вследствие высокой агрессивности среды, значительно возрастающей при повышении ее температуры, в качестве основного конструкционного материала теплообменного аппарата использовался титановый сплав марки VT-1-0. Работа выполнялась по заказу завода-изготовителя подогревателя и эксплуатирующей его организации. Целью работы было исследование случая сильной коррозии титановых трубок теплообменника, который подвергался воздействию растворяющего щелока при высоких температурах и давлении, выразившейся во множественных перфорациях размером до 30 мм со стороны подачи пара. При эксплуатации теплообменных аппаратов, работающих в тяжелых условиях, очень важно учитывать не только свойства коррозионной среды и материал, из которого изготовлено оборудование, но также рабочие температуры и давление, особенно их перепады, способы и периодичность удаления образовавшихся отложений. По результатам электрохимических методов исследований, сканирующей электронной микроскопии, элементного анализа представленных образцов титанового сплава и продуктов коррозии, а также анализа способа и периодичности удаления щелочной накипи были определены источники и механизм образования коррозии. Электрохимические измерения показали явное начало активной коррозии при температуре выше 80°C. Поток со взвешенными твердыми частицами, высокая степень отложений, вызывающих трещины, и, возможно, перегрев, могли быть существенными факторами коррозионного разрушения труб теплообменника. Наличие возможных гидравлических ударов, вибраций, повышенных давлений и перегревов способны очень быстро усугубить ситуацию.

Ключевые слова: коррозия титана, микроскопия электронная, исследования электрохимические, повреждения эрозивно-коррозионные, отложения щелочные, перегрев.

Для цитирования: Францкевич В. С., Поспелов А. В., Костюковец Д. А. Определение источника и механизма образования коррозии трубок подогревателя щелока в производстве KCl // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 2 (247). С. 100–106.

V. S. Frantskevich¹, A. U. Paspelau¹, D. A. Kostyukovets²
¹Belarusian State Technological University
²LLC “UMKA”

DETERMINATION OF THE SOURCE AND MECHANISM OF CORROSION FORMATION OF THE LIQUOR HEATER TUBES IN THE KCl PRODUCTION

Corrosion of technological equipment, utilities and structures is a very serious problem for industrial enterprises. The object of research was a liquor heater in the production of potash fertilizers by the halurgical method. Due to the high aggressiveness of the environment, which significantly increases with an increase in its temperature, titanium alloy of the VT-1-0 brand is used as the main structural material of the heat exchanger. The work was carried out by order of the heater manufacturer and its operating organization. The aim of the work was to study the case of severe corrosion of titanium tubes of a heat exchanger exposed to solvent liquor at high temperatures and pressures, expressed in multiple perforations up to 30 mm in size on the steam supply side. When operating heat exchangers operating in difficult conditions, it is very important to take into account not only the properties of the corrosive environment and the material from which the equipment is made, but also the operating temperatures and pressures, especially their differences, the methods and frequency of removal of the formed deposits. According to the results of electrochemical research methods, scanning electron microscopy, elemental analysis of the presented samples of titanium alloy and corrosion products, as well as analysis of the method and frequency of removal of alkaline scale, the sources and mechanism of corrosion formation were determined. Electrochemical measurements showed a clear onset of active corrosion above 80°C. Suspended solids flow and a high degree of fouling causing cracks and possibly overheating could be significant factors in the corrosive destruction of the heat exchanger tubes. The presence of

possible hydraulic shocks, vibrations, high pressures and overheating can very quickly aggravate the situation in the presence of the factors described in the article.

Key words: titanium corrosion, electronic microscopy, electrochemical studies, erosion-corrosion damage, alkaline deposits, overheating.

For citation: Frantskevich V. S., Paspelau A. U., Kostyukovets D. A. Determination of the source and mechanism of corrosion formation in the liquor heater tubes in the KCl production. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*. 2021, no. 2 (247), pp. 100–106 (In Russian).

Введение. Коррозия оборудования, инженерных сетей и сооружений является частым явлением, которое может привести к тяжелым последствиям. Так, например, износ сетей питьевого водоснабжения в Республике Беларусь оценивается в среднем около 80%. Это является причиной частых аварий и поступления воды населению несоответствующего качества. При этом основным воздействием следует считать использование хлорсодержащих дезинфицирующих веществ [1–7]. В производственных процессах для перемещения и хранения агрессивных сред используют нержавеющие стали, титановые сплавы и композиционные материалы [8]. Титан широко используется в химической промышленности из-за его хорошей коррозионной стойкости в различных агрессивных средах [9]. В то же время титан очень чувствителен к определенным воздействиям. Так, титановое оборудование может выйти из строя из-за воздействия среды с высоким содержанием водорода, что приводит к водородному охрупчиванию [10, 11]. Присутствие железа может служить катализатором выделения водорода [12]. Абразивный износ часто является причиной коррозии [13, 14]. Кроме того, разрушение титановых трубок теплообменников может происходить вследствие усталостного разрушения [15] даже из-за небольших вибрации, вызванных гидравлическими ударами перекачиваемой жидкости [16].

Например, авторы [17] изучали коррозию титановой трубки конденсатора. Окружающая среда в межтрубном пространстве представляла собой углеводород с паром низкого давления, а в трубном пространстве была морская вода. Они пришли к выводу, что отложения, эрозивная коррозия из-за наличия турбулентного потока и взвешенных твердых частиц привели к росту оксидной пленки на внутренней поверхности трубы, что привело к локальному перегреву и в дальнейшем к образованию трещин. Было обнаружено, что титановые сплавы марок 2 и 5 подвержены щелевой коррозии в морской воде при температурах 80 и 200°C соответственно [18]. Для титана марки 2 переходные процессы разрушения / репассивации пленки указывают на температурный порог около 65°C для инициирования щелевой корро-

зии [19]. Авторы [20] отмечают, что при эксплуатации титанового теплообменника в азотнокислой среде он начал корродировать в течение года эксплуатации.

Аналогичная ситуация сложилась с титановым кожухотрубным теплообменником одного из крупнейших производителей минеральных удобрений. Было обнаружено, что некоторые из титановых нагревательных трубок внутри подогревателя щелока вышли из строя из-за серьезной деградации после менее чем 5000 ч работы.

Целью данной работы было исследование случая коррозии титанового теплообменника, подвергшегося воздействию KCl–NaCl, содержащего растворяющий щелок. Интерпретация результатов этого исследования позволила дать рекомендации по минимизации коррозионного воздействия в будущем и модернизации титанового теплообменника на предприятиях по добыче калийной руды.

Основная часть. Теплообменник (материал титан ВТ-1-0 по ГОСТ 19807) предназначен для работы в существующих схемах нагрева для растворения щелока с использованием в качестве теплоносителя насыщенного водяного пара или перегретого конденсата. В результате щелок нагревается до 120°C под давлением. Поверхность теплообмена 179 м². Количество ходов – 4. Расположение теплообменника горизонтальное. Корпус аппарата с температурным дисковым линзовым компенсатором. Трубы 38×2,0 мм ВТ-1-0 ГОСТ 22897–86. Область коррозии – это место, где щелок достигает максимальной температуры перед выходом из теплообменника.

Заводом-изготовителем заявлен гарантийный срок на подогреватель – 24 месяца со дня ввода в эксплуатацию, а гарантийный срок службы трубок трубного пучка, исключаящий возникновение сквозной коррозии в теплообменнике, должен составлять не менее 5 лет с момента ввода аппарата в эксплуатацию.

Расход перекачиваемого щелока 300–600 м³/ч, а его физико-химические свойства: плотность 1,220–1,240 г/см³, температура кипения при атмосферном давлении 108°C. Химический состав, мас. %: KCl – 9–18, NaCl – 15–19, MgCl₂ + CaCl₂ – до 4,5, CaSO₄ – 0,1–0,12, остальное H₂O. Рабочая температура 60–100°C

(не более 121°C), pH 6,0–7,5, содержание не растворимого остатка до 150 мг/л. Среда агрессивная, абразивная, склонная к кристаллизации (для электрохимических испытаний использовали более низкие концентрации указанных интервалов).

Водяной пар: рабочее давление 0,4–0,6 МПа, температура 140–172°C.

Рентгенофазовый анализ полученных образцов проводили на рентгеновском дифрактометре D8 Advance Bruker AXS (Германия), детектор – сцинтилляционный счетчик. Запись производилась в диапазоне углов 2θ 10–80° с шагом 0,1–0,2° и накоплением импульсов в течение 2 с. Идентификация полученных рентгенограмм проводилась с применением специализированного программного обеспечения HighScore Plus и базы данных PDF-2.

Морфологию поверхности и элементный состав продуктов коррозии исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) JEOLJSM-5610LV, оснащенного системой химического микроанализа HighScore Plus и базы данных PDF-2.

Для анализа продуктов коррозии и углублений корродированных участков из титановых трубок были вырезаны образцы пораженных и целых участков трубки. Использовались потенциостат / гальваностат Metrohm Autolab PGSTAT 302N с трехэлектродными ячейками (100 мл), электрод сравнения Ag/AgCl в насыщенном KCl, решетчатый противэлектрод Pt и образец из нержавеющей стали (0,785 см²) в качестве рабочего электрода для электрохимических измерений. Все измерения проводились при комнатной температуре (≈21°C), 60, 70, 80 и 90°C и повторялись не менее трех раз. Растворы не деаэрировались. Потенциодинамическую поляризацию получали со скоростью сканирования 1 мВ/с в диапазоне от –200 до +200 мВ относительно потенциала холостого хода, который сначала определяли в течение 5 мин.

На рис. 1 показано отверстие диаметром до 25 мм в трубе теплообменника. По изученным образцам было видно, что коррозия начинается с внутренней стороны трубки.

Был проанализирован номинальный объемный состав титановой трубки. Он соответствовал составу титана марки 2 (табл. 1). Суммарное содержание примесей 0,089 мас. %.

На основании нашей предыдущей работы [8] известно, что неправильная очистка может также вызвать коррозию. По информации эксплуатирующей подогреватель организации процедура очистки включает в себя только механическое удаление накипи и промывку водой.

Чтобы выяснить, какие вещества вызвали сильную коррозию титановых трубок, были проанализированы продукты коррозии. Результаты элементного анализа показаны в табл. 2.

Таблица 1

Измеренный состав (мас.%) исследуемого образца титановой трубки и стандартный состав для титана марки 2

Элемент	Образец	ГОСТ
H	0,0002	<0,01
O	0,129	<0,2
C	0,006	<0,07
N	<0,001	<0,04
Al	0,017	<0,7
Si	0,005	<0,1
Ti	Остальное	99,24–99,7
Fe	0,100	<0,25
Cu + Ni	0,022	–
Cr + Mn	0,022	–



Рис. 1. Коррозия титановой трубки

Таблица 2

Состав продуктов коррозии (средний) по результатам элементного анализа

Элемент	Содержание	
	мас. %	ат. %
O	34,8 ± 13,1	58,1 ± 11,2
Al	0,7 ± 0,5	0,6 ± 0,4
Si	0,5 ± 0,1	0,5 ± 0,0
S	7,0 ± 7,3	5,5 ± 5,2
Cl	0,1 ± 0,1	0,1 ± 0,1
Ca	16,4 ± 15,5	10,3 ± 8,6
Ti	36,0 ± 33,5	22,7 ± 23,4
Fe	2,3 ± 2,8	1,3 ± 1,6
Cu	1,1 ± 0,5	0,4 ± 0,1
Zn	1,3 ± 0,8	0,6 ± 0,4

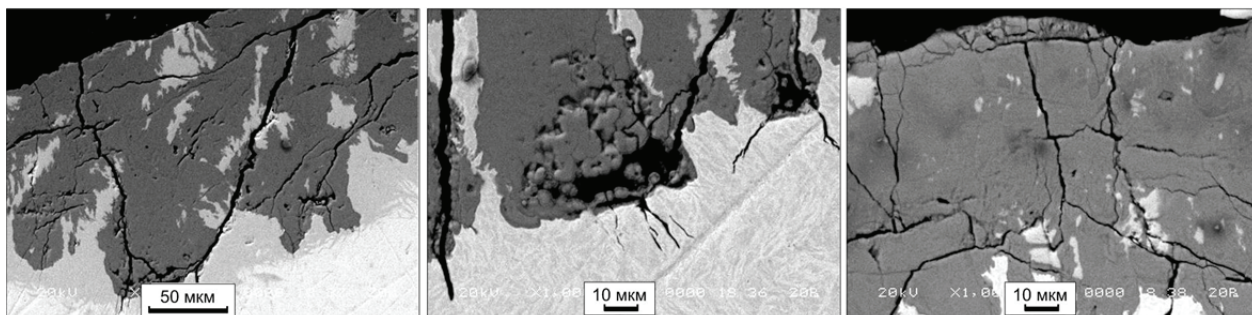


Рис. 2. Микрофотографии поперечного сечения

По результатам исследования продуктов коррозии установлено, что их основное содержание – это диоксид титана. Хлор был обнаружен в более низкой концентрации (макс. 0,6 мас. % на основе элементного анализа). Также были обнаружены в минимальном количестве кристаллы сульфата кальция.

Известно, что железо может катализировать выделение водорода и вызывать водородное растрескивание (охрупчивание), а также может быть причиной межкристаллитной коррозии. Для этого было изучено поперечное сечение скорродированного образца (рис. 2).

Судя по представленным микрофотографиям шлифа, можно сделать вывод, что трещины распространяются первыми, а потом «заполняются» продуктами коррозии. Трещины проходят сквозь оксид титана и продолжают в металле, что необычно. Возможно, в трещинах присутствует водород, что могло вызвать быстрое их распространение. Распределение железа не предполагает его участия в коррозионных процессах, но, как правило, оно может быть катализатором выделения водорода и, следовательно, увеличивать водородное охрупчивание. Похоже, что трещины на поверхности межкристаллитные, а снизу они проходят сквозь зерна. Межкристаллитное растрескивание – более медленный процесс, часто связанный с реакциями, проходящими при коррозионных процессах. Границы зерен являются слабыми местами, и трещины распространяются по ним. Видно, что по какой-то причине трещины очень быстро распространяются через зерна и даже от оксида металла в металлическую матрицу. Вероятной причиной может быть наличие водорода, стрессовые воздействия или и то, и другое вместе, что является ускоряющими факторами. Также свою роль играет внешнее и внутреннее давление 0,6 МПа, что усугубляет ситуацию, но не считается основной причиной. Чтобы определить, распространяются ли трещины вдоль границы зерен или сквозь них, шлиф был протравлен.

Сам по себе рост оксида титана также может вызывать существенные напряжения, поскольку оксид имеет меньшую плотность и

большой объем, чем металл. Молярный объем TiO_2 (рутила) составляет $18,84 \text{ см}^3$, а металлического титана – $10,54 \text{ см}^3$. Таким образом, заполнение пор или трещин оксидом может вызвать напряжения в металле, которые приведут к его дальнейшему растрескиванию. Но также не похоже, что это является основным механизмом здесь, может быть, только в начале процесса разрушения.

Вероятнее всего, коррозия возникает за счет совокупности следующих факторов: наличие в потоке твердых частиц, высокое давление, непрерывная работа. Это приводит к начальному истиранию защитного оксидного слоя, затруднению его репассивации и в итоге к появлению начальной точечной коррозии, последующему заполнению оксидом, растрескиванию и т. д. Данный процесс может быть очень быстрым. Титановые сплавы чувствительны ко всем видам истирания и механического воздействия.

Распределение хлора в поперечном сечении также предполагает, что растрескивание, вызванное коррозией, не является основным механизмом, далее наблюдается ускоренный процесс растрескивания. При этом следует отметить, что, как утверждает эксплуатирующая организация, вибраций и других динамических нагрузок в процессе эксплуатации теплообменника нет, как нет и температурных перепадов. При остановке на техобслуживание (1 раз в 3 месяца) применяется только механическая очистка и дальнейшая промывка водой.

Известно, что большая разница температур создает оптимальные условия для разделения на высокотемпературную область, которая может действовать как анод, и большую низкотемпературную часть, действующую как катод и ускоряющую локализованную коррозию на анодном участке. Тем не менее требуется активация самой горячей области, вызываемая высокой температурой. Отложения щелока могут стать причиной трещин, в которых коррозия возникает гораздо легче. Повышенное содержание железа (и, возможно, Cu и Zn) в титановом сплаве увеличивает образование водорода, что способствует возникновению

и распространению трещин. Кроме того, наличие железа приводит к выделениям фаз, богатых углеродом на границах зерен, способствуя межкристаллитной коррозии (которая также усиливает распространение трещин). В таких условиях высокое содержание хлоридов, вероятно, вызывает дополнительно сильную коррозию.

Аналогичная ситуация на титановой трубке конденсатора, имеющей коррозионные перфорации большого размера, была рассмотрена в статье [11]. В межтрубном пространстве находился углеводород с паром низкого давления, а в трубном пространстве была морская вода. Трубка была полностью забита щелочной накипью, состоящей из карбоната кальция и сульфата кальция. Исследование показало, что на начальных стадиях загрязнения титановая трубка подвергается эрозионно-коррозионным повреждениям в результате воздействия турбулентного потока и взвешенных твердых частиц.

С другой стороны, когда трубка полностью засорилась, произошел перегрев, что привело к росту оксидной пленки на внутренней поверхности трубки. Однако пленка оксида титана потрескалась из-за давления, оказываемого растущим оксидом внутри трубки, что вызвало разрыв ее стенки.

Заключение. Результаты исследований показывают, что при выборе материала для инженерных сетей или сооружений, необходимо учитывать не только агрессивность используемой среды, но и совокупность дополнительных факторов, которые могут привести к коррозии выбранного материала. В рассмотренном случае незначительное содержание взвешенных веществ в среде трубного пространства при наличии избыточного давления и высоких температур привели к инициации коррозии титановых трубок теплообменника и выходу его из строя в гарантийный срок эксплуатации.

Список литературы

1. Технические аспекты использования озона в водоподготовке / В. И. Романовский [и др.] // Вода Magazine. 2016. № 2 (102). С. 36–41.
2. Romanovski V. I., Claesson P. M., Hedberg Y. S. Comparison of different surface disinfection treatments of drinking water facilities from a corrosion and environmental perspective // Environmental Science and Pollution Research. 2020. № 27 (11). P. 12704–12716.
3. Романовский В. И., Бессонова Ю. Н. Сравнительный анализ способов дезинфекции водозаборных скважин и сооружений водоснабжения // Перспективы развития и организационно-экономические проблемы управления производством: материалы Междунар. науч.-техн. конф: в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т. Минск, 2015. Т. 1. С. 211–226.
4. Романовский В. И., Лихавицкий В. В., Гуринович А. Д. Исследование растворимости озона в воде по высоте столба жидкости // Труды БГТУ. 2015. № 3: Химия и технология неорганич. в-в. С. 113–118.
5. Романовский В. И., Чайка Ю. Н. Коррозионная устойчивость углеродистых сталей к дезинфицирующим растворам // Труды БГТУ. 2014. № 3: Химия и технология неорганич. в-в. С. 47–50.
6. Гуринович А. Д., Романовский В. И., Бессонова Ю. Н. Эффективность дезинфекции озонем сооружений систем водоснабжения // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2016. № 10. С. 48–51.
7. Определение основных параметров дезинфекции и обеззараживания озонем сооружений питьевого водоснабжения / В. И. Романовский [и др.] // Труды БГТУ. 2015 № 3: Химия и технология неорганич. в-в. С. 108–112.
8. Inappropriate cleaning treatments of stainless steel AISI 316L caused a corrosion failure of a liquid transporter truck / V. Romanovski (et al.) // Engineering Failure Analysis. 2020. No. 117. P. 104–115.
9. Collings E. W. Materials properties handbook: titanium alloys. Materials Park (OH): ASM International, 1994. 1169 p.
10. Failure analysis of a titanium Coriolis mass flow meter: A case of hydrogen embrittlement / I. G. R. Santos (et al.) // Engineering Failure Analysis. 2020. No. 115. P. 30–46.
11. Covington L. C. The influence of surface condition and environment on the hydriding of titanium // Corrosion. 1979. No. 35 (8). P. 378–382.
12. L. Covington, R. Schutz. Effects of Iron on the Corrosion Resistance of Titanium // Industrial Applications of Titanium and Zirconium. 1981. P. 163–180.
13. Chen F. J., Yao C., Yang Z. G. Failure analysis on abnormal wall thinning of heat-transfer titanium tubes of condensers in nuclear power plant. Part I: Corrosion and wear // Engineering Failure Analysis. 2014. No. 37. P. 29–41.
14. Chen F. J., Yao C., Yang Z. G. Failure analysis on abnormal wall thinning of heat-transfer titanium tubes of condensers in nuclear power plant. Part II: Erosion and cavitation corrosion // Engineering Failure Analysis. 2014. No. 37. P. 42–52.

15. Failure Analysis and Fatigue Investigation on Titanium Tubes in a Condenser / S. Shen (et al.) // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2016. No. 16 (6). P. 975–981.
16. Failure analysis and critical manufacturing technology research on titanium condensers / G. L. Ma (et al.) // *Engineering Failure Analysis*. 2005. No. 12 (3). P. 432–439.
17. Failure of titanium condenser tube / H. M. Shalaby // *Engineering Failure Analysis*. 2011. No. 18 (8). P. 1990–1997.
18. Pang J., Blackwood D. J. Corrosion of titanium alloys in high temperature near anaerobic seawater // *Corrosion Science*. 2016. No. 105. P. 17–24.
19. He X., Noël J. J., Shoosmith D. W. Temperature dependence of crevice corrosion initiation on titanium grade-2 // *Journal of the Electrochemical Society*. 2002. No. 149(9). B440.
20. Failure analysis of titanium heater tubes and stainless steel heat exchanger weld joints in nitric acid loop / A. R. Shankar (et al.) // *Engineering Failure Analysis*. 2019. No. 99. P. 248–262.

References

1. Romanovsky V. I., Gurinovich A. D., Bessonova Yu. N., Kryshilovich E. V. Technical aspects of the ozone use for water treatment. *Voda Magazine* [Water Magazine], 2016, no. 2 (102), pp. 36–41 (In Russian).
2. Romanovski V. I., Claesson P. M., Hedberg Y. S. Comparison of different surface disinfection treatments of drinking water facilities from a corrosion and environmental perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, no. 27 (11), pp. 12704–12716.
3. Romanovsky V. I., Bessonova Yu. N. Comparative analysis of methods of disinfection of water wells and water supply facilities. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Perspektivy razvitiya i organizatsionno-ekonomicheskiye problemy upravleniya proizvodstvom": v 2 tomakh* [Materials of International scientific and technical conference "Development prospects and organizational and economic problems of production management": in 2 vol.]. Minsk, 2015, vol. 1, pp. 211–226 (In Russian).
4. Romanovsky V. I., Likhavitsky V. V., Gurinovich A. D. Investigation of the solubility of ozone in water by the height of the liquid column. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 3: Chemistry and Technology of Inorganic Substances, pp. 113–118 (In Russian).
5. Romanovsky V. I., Chaika Yu. N. Corrosion resistance of carbon steels to disinfectant solutions. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 3: Chemistry and Technology of Inorganic Substances, pp. 47–50 (In Russian).
6. Gurinovich A. D., Romanovsky V. I., Bessonova Yu. N. Efficiency of ozone disinfection of water supply system structures. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzheniye* [Water purification. Water treatment. Water supply], 2016, no. 10, pp. 48–51 (In Russian).
7. Romanovsky V. I., Likhavitsky V. V., Rymovskaya M. V., Gurinovich A. D. Determination of the main parameters of disinfection and ozone disinfection of drinking water supply facilities. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 3: Chemistry and Technology of Inorganic Substances, pp. 108–112 (In Russian).
8. Romanovski V., Frantskevich V., Kazlouski V., Kasach A., Paspelau A., Hedberg Y., Romanovskaia E. Inappropriate cleaning treatments of stainless steel AISI 316L caused a corrosion failure of a liquid transporter truck. *Engineering Failure Analysis*, 2020, no. 117, pp. 104–115.
9. Collings E. W. *Materials properties handbook: titanium alloys*. Materials Park (OH), ASM International, 1994. 1169 p.
10. Santos I. G. R., Vacchi G. S., Silva R., Kugelmeier C. L., Magalhães D. C. C., Campesan G. R., Rovere C. A. D. Failure analysis of a titanium Coriolis mass flow meter: A case of hydrogen embrittlement. *Engineering Failure Analysis*, 2020, no. 115, pp. 30–46.
11. Covington L. C. The influence of surface condition and environment on the hydriding of titanium. *Corrosion*, 1979, no. 35 (8), pp. 378–382.
12. Covington L., Schutz R. Effects of Iron on the Corrosion Resistance of Titanium. *Industrial Applications of Titanium and Zirconium*, 1981, pp. 163–180.
13. Chen F. J., Yao C., Yang Z. G. Failure analysis on abnormal wall thinning of heat-transfer titanium tubes of condensers in nuclear power plant. Part I: Corrosion and wear. *Engineering Failure Analysis*, 2014, no. 37, pp. 29–41.
14. Chen F. J., Yao C., Yang Z. G. Failure analysis on abnormal wall thinning of heat-transfer titanium tubes of condensers in nuclear power plant. Part II: Erosion and cavitation corrosion. *Engineering Failure Analysis*, 2014, no. 37, pp. 42–52.
15. Shen S., Li X., Zhang P., Nan Y., Song X. Failure Analysis and Fatigue Investigation on Titanium Tubes in a Condenser. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2016, no. 16 (6), pp. 975–981.

16. Ma Q. L., Xu H., Wang Z. W., Hou F., Xu L. Y. Failure analysis and critical manufacturing technology research on titanium condensers. *Engineering Failure Analysis*, 2005, no. 12 (3), pp. 432–439.
17. Shalaby H. M., Al-Mazeedi H., Gopal H., Tanoli N. Failure of titanium condenser tube. *Engineering Failure Analysis*, 2011, no. 18 (8), pp. 1990–1997.
18. Pang J., Blackwood D. J. Corrosion of titanium alloys in high temperature near anaerobic seawater. *Corrosion Science*, 2016, no. 105, pp. 17–24.
19. He X., Noël J. J., Shoesmith D. W. Temperature dependence of crevice corrosion initiation on titanium grade-2. *Journal of the Electrochemical Society*, 2002, no. 149 (9), B440.
20. Shankar A. R., Sole R., Thyagarajan K., George R. P., Mudali U. K. Failure analysis of titanium heater tubes and stainless steel heat exchanger weld joints in nitric acid loop. *Engineering Failure Analysis*, 2019, no. 99, pp. 248–262.

Информация об авторах

Францкевич Виталий Станиславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: fvs2@tut.by

Поспелов Андрей Владимирович – научный сотрудник Центра физико-химических методов исследования. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Andrei29088@mail.ru

Костюковец Дмитрий Анатольевич – директор ООО «УМКА» (223707, г. Солигорск, пр-т Мира, 32, Республика Беларусь). E-mail: dicd@bk.ru

Information about the authors

Frantskevich Vitaliy Stanislavovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fvs2@tut.by

Paspelau Andrey Uladzimiravich – scientific researcher, the Center for Physical and Chemical Research Methods. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Andrei29088@mail.ru

Kostyukovets Dmitriy Anatol'yevich – Director. LLC “UMKA” (32, Mira Ave., 223707, Soligorsk, Republic of Belarus). E-mail: dicd@bk.ru

Поступила 30.04.2021