

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРОЗИИ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ В ПРИМЕНЕНИИ К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ СРОКА СЛУЖБЫ КОНТЕЙНЕРОВ

К. А. Болдырев

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 19 октября 2022 г.

В статье проведен обзор работ, посвященных коррозии углеродистой стали в условиях подземного захоронения, представлена модель ее коррозии в контакте с бентонитом, учитывающая кинетику окисления, ингибирование поверхности стали вследствие блокирования ее продуктами коррозии, а также процессы сорбции катионов на материале бентонита. Верификация модели проводилась на основе сравнения с литературными данными. Моделирование показало близкие к экспериментальным результатам расчетные значения скорости коррозии. Результаты работы могут быть использованы при прогнозировании коррозии инженерных барьеров безопасности (ИББ) из углеродистой стали.

Ключевые слова: углеродистая сталь, анаэробная коррозия, геохимическое моделирование, PHREEQC, радиоактивные отходы.

Актуальность

В качестве материалов для изготовления контейнеров, предназначенных для захоронения радиоактивных отходов (РАО), в настоящее время рассматриваются нержавеющая и углеродистая стали, медь, сплавы на основе никеля, титана, циркония, карбид кремния [1]–[8]. В качестве материала буфера, предназначенного для изоляции контейнеров в ячейке захоронения, в основном используются либо бентонит (или бентонито-песчаные смеси), либо портландцементы. Так, Швеция, Финляндия и Канада выбрали концепцию медных или омедненных контейнеров с буфером из бентонита [9]–[11], а Бельгия — бетон [12], [13]. Бельгия, Канада, Франция, Швейцария, Япония рассматривают углеродистую сталь (УС) в качестве материала

контейнеров [14]. Аналогичный материал для контейнеров рассматривается и в Российской Федерации. Выбранные разными странами стратегии ПГЗРО представлены в таблице 1.

УС имеют ряд достоинств в качестве материала контейнеров — прежде всего высокую изученность и предсказуемость поведения, удовлетворительные механические свойства, удовлетворительная коррозионная стойкость в анаэробной обстановке [18]–[20], равномерная площадная коррозия; продукты коррозии железа являются хорошими сорбентами ряда радионуклидов [21]–[24]. Однако этот материал подвержен влиянию биогенной коррозии, так, в работах [25]–[28] обнаружено увеличение скорости коррозии УС в присутствии микроорганизмов,

Таблица 1. Выбранные разными странами стратегии ПГЗРО [15] – [17]

Страна	Вмещающая порода	Буферный материал	Материал контейнера
Бельгия	Формация глин Boom	Бетон	УС/цемент
Великобритания		Бентонит	УС, медь
Германия	Гранит/глинистый массив/соляной массив	Пока не принято решение	Пока не принято решение
Испания	Гранит/глинистые породы	Бентонит	УС
Канада	Гранит или осадочные породы	Бентонит	Медь/УС
Россия	Кристаллические породы	Бентонит (материал рассматривается)	УС (материал рассматривается)
США	Туфы (ненасыщенные)	Бентонит	Ni-Cr, Ti сплавы
Финляндия	Гранит	Бентонит	Медь/чугун
Франция	Формация глин (Callovo-Oxfordian)	Глина	УС
Швейцария	Формация глин Opalinus	Бентонит	УС
Швеция	Гранит	Бентонит	Медь/чугун
Япония	Варьирующая вмещающая порода	Бентонит	УС

хотя считается, что использование бентонита высокой плотности — более 1,5 г/см³ — может исключить микробную активность [29]–[31].

Прогнозирование срока службы материалов контейнеров радиоактивных отходов в объектовых условиях пункта захоронения является

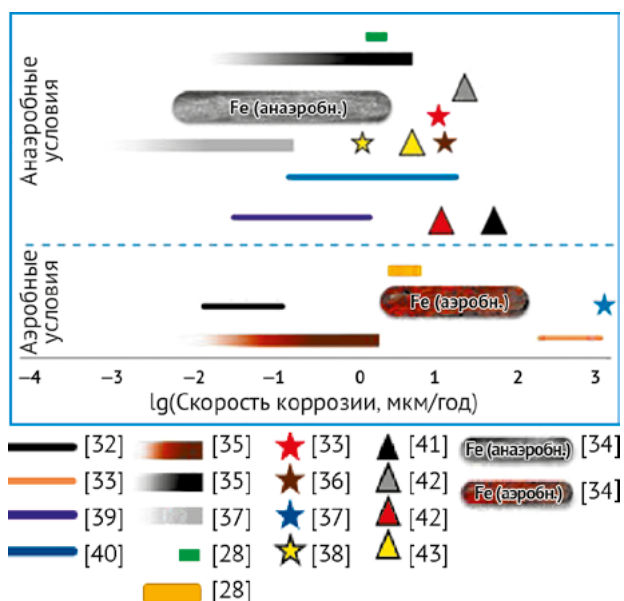


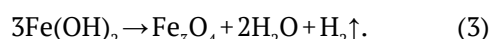
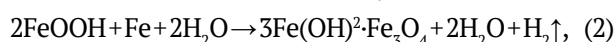
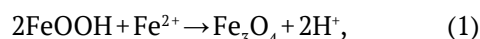
Рис. 1. Скорости коррозии УС, в том числе и исторических аналогов, мкм/год

одной из важных задач при оценке безопасности. Типичные скорости коррозии углеродистых сталей, определенные в процессе многолетних наблюдений, находятся в пределах от менее десятых до единиц мкм в год. Наглядное представление о скоростях коррозии УС, в том числе и исторических аналогов, приведено на рис. 1.

В данной статье рассматриваются вопросы коррозии УС марки Ст3 в различных условиях. Целью является создание комплексной модели коррозии УС, учитывающей влияние температуры, а также бентонита как потенциального материала буфера.

Накопление продуктов коррозии

При аэробной коррозии стальных ИББ наличие Fe³⁺ приводит к образованию гётита (α-FeOOH) и лепидокрокита (γ-FeOOH). При их перекристаллизации могут образовываться магемит (γ-Fe₂O₃) или гематит (α-Fe₂O₃). Fe³⁺ также образуется при окислении Fe(2) в растворе. При этом может образоваться магнетит (Fe₃O₄) (уравнение (1)), который также может образовываться при восстановлении окисленных форм (уравнение (2)). При аэробной коррозии образуется сначала Fe(OH)₂, который затем переходит в магнетит Fe₃O₄ в процессе реакции Шиккора (уравнение (3)). В карбонатных растворах может образовываться сидерит. Рис. 2 иллюстрирует образование продуктов коррозии в различных средах — анаэробной, аэробной, карбонатной — и их эволюцию.



Образовавшиеся продукты коррозии обладают отличным от исходного железа молекулярным

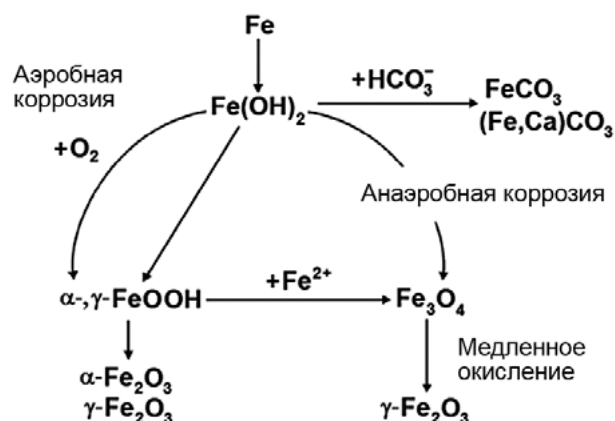


Рис. 2. Схема образования и переходов продуктов коррозии углеродистой стали в различных средах [44]

объемом [45]. Их образование при коррозии стальной арматуры в железобетоне может приводить к растрескиванию железобетона, а также изменению свободной пористости в зоне контакта корродирующего стального ИББ с другими барьерами, например с бентонитом.

Скорость анаэробной коррозии в контакте с бентонитом может быть выше, чем при его отсутствии, вследствие сорбции ионов Fe^{+2} бентонитом, что снижает толщину коррозионного слоя, а также вследствие буферирования pH (широко известный факт подщелачивания при коррозии будет компенсироваться взаимодействием образовавшихся при коррозии гидроксил-ионов с непродиссоциировавшими центрами твердых минеральных фаз и с амфотерными оксигидроксидными фазами). Состав пленки коррозионного слоя и его структура по-разному влияют на скорость коррозии: считается, что карбонатные формы более прочны, чем осадок в виде магнетита [46].

Модель площадной коррозии углеродистой стали

Общая или равномерная коррозия приводит к однородному уменьшению толщины материала. Характерной особенностью материалов типа УС является формирование защитной пленки на поверхности корродирующего материала, вследствие чего скорость коррозии со временем уменьшается. Уравнение кинетики площадной коррозии УС, в зависимости от условий среды, описывается следующим образом [28]:

$$\frac{dL}{dt} = F(\text{аэроб, анаэроб, } Cl^-, \text{ био...}) \times e^{-\frac{E_A}{RT}} \times f_T \times (1 - SR(Fe_{met})), \quad (4)$$

где: dL/dt — скорость коррозии, (моль/м²с);
 $F(\text{аэроб, анаэроб, } Cl^-, \text{ био...})$ — функциональная зависимость влияния i -х процессов (аэробного, анаэробного процесса, концентрации хлорида, сульфида и т. д.), со своими энергиями активации;
 f_T — функция ингибирования, связанная с блокированием поверхности образующимися продуктами коррозии [28], [47];
 SR — отношение текущего произведения активностей ионов к константе, описывающей реакцию растворения железа.

Моделирование коррозии углеродистой стали в различных условиях

УС относится к материалам, нестойким в кислых и нейтральных средах. В кислой среде

высокая скорость коррозии наблюдается до значений pH=4; при значениях pH от 4 до 10 остается приблизительно постоянной, на минимальном значении.

Условия эксперимента также значительно влияют на определяемую скорость коррозии. На рис. 3 представлены изменения скорости коррозии УС с выдержкой в геотермальной воде при 80 °С в условиях статического и динамического эксперимента, согласно [48].

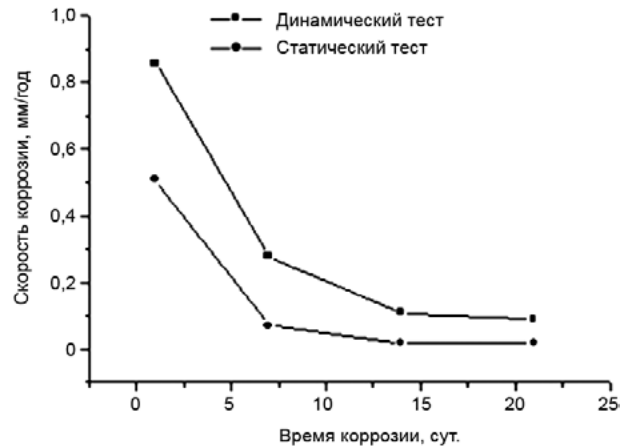


Рис. 3. Изменения скорости коррозии углеродистой стали с выдержкой в геотермальной воде при 80 °С в условиях статического и динамического эксперимента [48]

Данные результаты демонстрируют, что скорость коррозии будет также определяться относительным насыщением воды ионами железа. Смена воды приводит к снижению концентрации ионов железа в растворе, а следовательно, к снижению образования продуктов коррозии на поверхности корродирующего стального образца, что приведет к ее ускорению.

Влияние катионов на питтинговую коррозию следующее: все одновалентные катионы, включая Na^+ , K^+ , Rb^+ и Cs^+ (за исключением Li^+), увеличивают восприимчивость железа и УС к питтинговой коррозии [49]. Общее воздействие иона на коррозию уменьшается с увеличением размера катиона. Среди двухвалентных катионов только Zn^{2+} увеличивает восприимчивость УС к питтинговой коррозии, вследствие этого требуется проводить исследования влияния подобных ионов на процесс коррозии УС. Степень влияния галогенид-ионов на локализованную питтинговую коррозию находится в следующем ряду: $Cl^- > Br^- > F^-$.

Локализованная коррозия углеродистых сталей в форме питтинга в научной литературе описывается, как правило, на основе эмпирических данных, а не на основе механистических моделей. В работах [37], [50] авторы использовали

следующее выражение для описания максимальной глубины питтинговой коррозии в условиях захоронения:

$$P = 8,35 \times t^{0,46}, \quad (5)$$

где P — глубина, мм;
 t — время, год.

Коррозия УС опосредуется не только кислородом, но и растворенным карбонат-ионом, а также сульфид-ионом. Сравнение скорости коррозии стали в присутствии H_2S , CO_2 и O_2 отображено на рис. 4, адаптировано из [51].

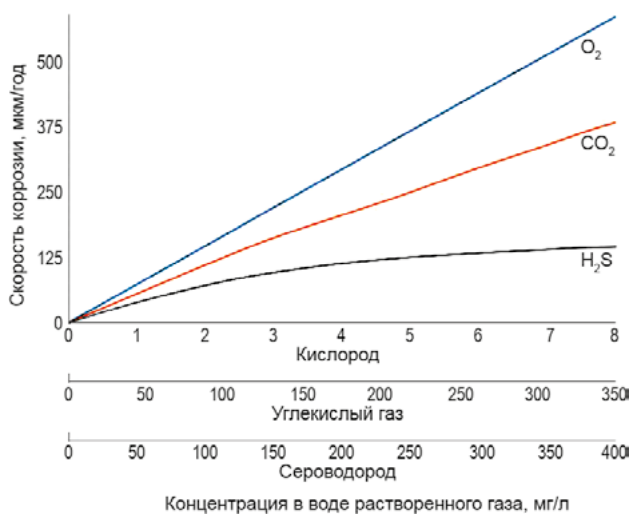
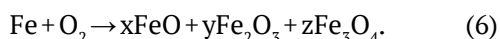
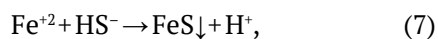


Рис. 4. Скорости коррозии стали в присутствии H_2S , CO_2 и O_2

Реакция окисления железа и УС с растворенным кислородом упрощенно выглядит следующим образом:



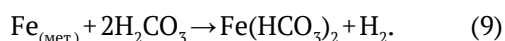
Реакция коррозии этого материала в присутствии растворенного сульфид-иона:



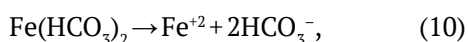
а образовавшийся сульфид железа, пирротин, в дальнейшем может преобразоваться в пирит:



Ускорение коррозии при повышенных концентрациях растворенного карбоната объясняется следующим образом:

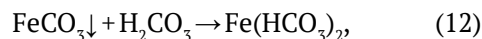


Образовавшийся гидрокарбонат железа преобразуется в карбонат:



Образовавшийся карбонат железа является весьма прочным продуктом, изолирующим

поверхность. Однако при высоких концентрациях карбонат-иона образовавшийся защитный слой начинает растворяться:



что вызывает ускорение коррозии.

Скорость коррозии зависит от проводимости (следовательно, от минерализации) воды. Рис. 5 иллюстрирует влияние увеличения концентрации хлорид-иона на скорость коррозии железа в аэрированном растворе при комнатной температуре [52]. Добавление NaCl до 3% масс. Cl⁻ является предельной, далее с ростом концентрации хлорида коррозионная активность воды снижается. С увеличением солёности раствора снижаются растворимость в нем кислорода и, следовательно, скорость коррозии. Однако эффект увеличения скорости коррозии в присутствии хлорид-иона для анаэробной коррозии также сохраняется.

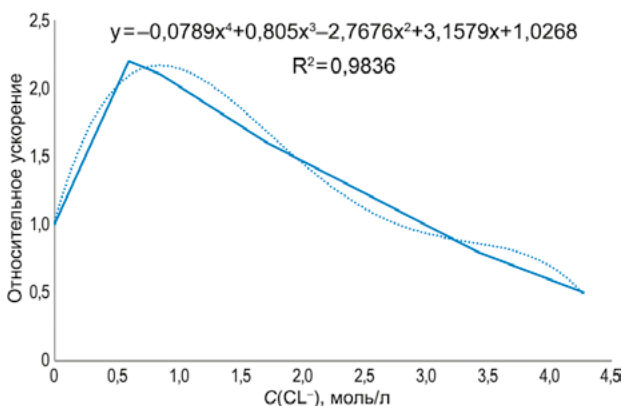


Рис. 5. Изменение скорости коррозии железа в аэробных условиях при комнатной температуре в зависимости от концентрации ионов Cl⁻ [52]

Функции влияния растворенных сероводорода, углекислого газа и хлорид-иона выглядят следующим образом:

$$f_{\text{сульфид}} = 2,76 \times 10^{-7} \times C(H_2S)^{0,8}. \quad (13)$$

$$f_{\text{углекислый газ}} = 7,1 \times 10^{-7} \times C(CO_2), \quad (14)$$

$$f_{Cl} = 1 + 2,7 \times 10^{-7} \times C(Cl^-), \quad (15)$$

где: $C(H_2S)$ — концентрация сероводорода, моль/л; $C(CO_2)$ — концентрация растворенного углекислого газа; $C(Cl^-)$ — концентрация хлорид-иона, моль/л;

На рис. 6 отображены рассчитанные скорости коррозии УС в воде с содержанием растворенного сероводорода 4 ммоль/л и в дистиллированной воде за период моделирования 10 лет. Также на нем отображены рассчитанные скорости коррозии УС в средах с содержанием

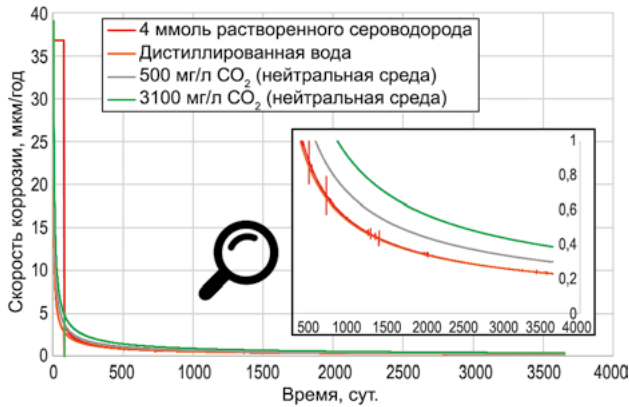
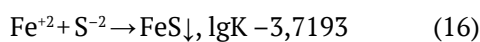


Рис. 6. Рассчитанные скорости коррозии углеродистой стали в воде с содержанием растворенного сероводорода 4 ммоль/л и в дистиллированной воде, а также в средах с разным содержанием растворенной углекислоты

растворенной углекислоты 500 и 3 100 мг/л. При рассмотрении рис. 6 видно, что растворенный сульфид-ион ускоряет коррозию УС в анаэробных условиях: средняя скорость коррозии за период моделирования 10 лет для системы с присутствием 4 ммоль/л растворенного сероводорода составила величину 1,36 мкм/год, в дистиллированной воде — 0,7 мкм/год. Тем не менее финальные скорости коррозии на 10-й год составили сравнимые величины, соответственно, около 0,23 мкм/год и 0,22 мкм/год. Ступенчатая площадка объясняется понижением pH в начальный момент времени за счет гидролиза ионов железа, в дальнейшем наблюдается рост pH и образование сульфида железа, пирротина по реакции:



Интересный эффект наблюдается при сравнении влияния концентрации карбонат-иона (рис. 6). Так, малая концентрация углекислоты практически не приводит к росту скорости коррозии (средняя скорость 0,7 мкм/год, что сравнимо со скоростью для дистиллированной воды), однако финальная скорость коррозии уменьшается (продукт коррозии сидерит обладает большим ингибирующим эффектом вследствие большей прочности, чем окиси железа) до 0,07 мкм/год. Однако высокое содержание растворенной углекислоты приводит к росту средней скорости коррозии до 1,3 мкм/год и росту конечной скорости коррозии до 0,3 мкм/год.

Влияние образования газообразного водорода на коррозию является дискуссионным вопросом.

Обычно в экспериментах не исследуется это влияние, а скорости коррозии рассчитываются по объемам выделенного водорода либо по изменению массы пластин стали. Однако влияние, несомненно, есть: обычно на фотографиях корродирующих образцов, представленных в литературе, видно, что коррозия носит неравномерный характер, имеются участки с различной степенью коррозии. Это влияние можно учесть при условии воспроизведения ситуации образования водорода на поверхности корродирующей стали, изолирующей ее от контакта с водной фазой. Гипотетически процесс ингибирования реакции окисления стали новосозданными пузырьками водорода, блокирующими поверхность, может быть записана при помощи того же подхода, что мы используем для учета ингибирования коррозии новосозданными продуктами коррозии.

Моделирование аэробной и анаэробной коррозии

Как было указано выше, модель площадной коррозии показывает весьма удовлетворительные результаты прогнозирования коррозии УС при контакте с водой и барьерными материалами. Результаты расчета скоростей коррозии УС, выраженные в мкм/год, в условиях различных температур в растворе А (см. сноску) при разных температурах приведены на рис. 7.

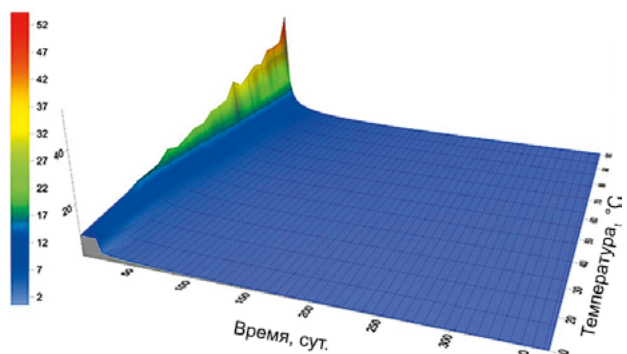


Рис. 7. Кривые зависимостей анаэробной скорости коррозии углеродистой стали при разных температурах в воде состава А (уровень pH не фиксирован)

Скорости анаэробной коррозии УС в указанном растворе при разных температурах на 365-е сутки приведены на рис. 8, а скорости аэробной коррозии углеродистой стали в воде вышеуказанного

А: $\text{pH} 7.1, \text{Si}(1,16 \times 10^{-4} \text{ моль/л}), \text{Cl}(7,14 \times 10^{-4} \text{ моль/л}), \text{C}(3,4 \times 10^{-3} \text{ моль/л})$
 $\text{Na}(1,4 \times 10^{-3} \text{ моль/л}), \text{K}(1,15 \times 10^{-4} \text{ моль/л}), \text{Mg}(4,94 \times 10^{-4} \text{ моль/л}), \text{Ca}(1,21 \times 10^{-3} \text{ моль/л}), \text{Fe}(5,35 \times 10^{-5} \text{ моль/л})$

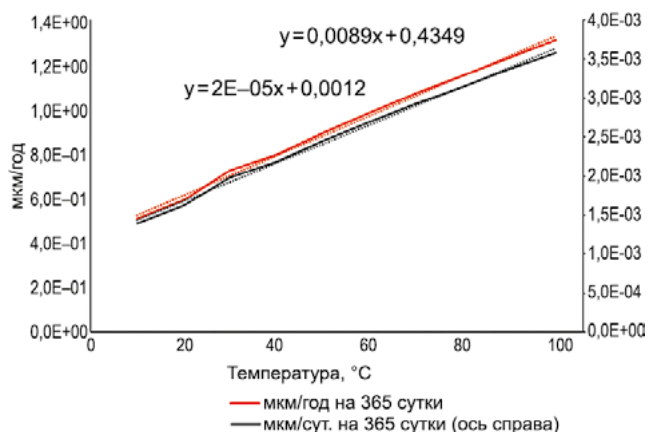


Рис. 8. Скорости анаэробной коррозии углеродистой стали при разных температурах в воде состава А (см. сноску на предыдущей странице)

состава при разных температурах приведены на рис. 9. Функциональные зависимости скорости анаэробной коррозии от температуры выглядят следующим образом:

$$\text{Скорость (мкм/год)} = 0,0089 \times 10^{-5} \times T + 0,4349. \quad (17)$$

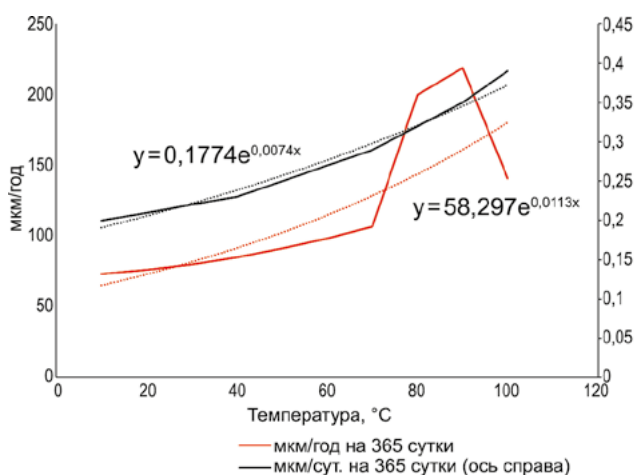


Рис. 9. Рассчитанные скорости аэробной коррозии углеродистой стали при разных температурах в воде состава А

Функциональные зависимости скорости аэробной коррозии от температуры выглядят следующим образом:

$$\text{Скорость (мкм/год)} = 58,297 \times e^{0,113 \times T}, \quad (18)$$

Данные значения могут быть использованы в качестве исходных для прогнозирования скорости анаэробной коррозии при долгосрочном моделировании. На основе полученных данных может быть наполнена значениями модель упрощенного табличного подхода к расчету скорости коррозии, согласно которому формула для расчета сохранения целостности металлического ИББ выглядит следующим образом [53]:

$$t = k \times \sum_i \frac{L_{T_i}}{V_{T_i}}, \quad (19)$$

где t — время сохранения изолирующих свойств стального ИББ;

k — член, учитывающий нерегулярность и неравномерность площадной коррозии, включающий в себя влияние механического разрушения стенок барьера и неучитываемые механизмы коррозии (питтинговая, язвенная и пр.) (согласно [53] выбран в пределах 0,5–0,75);

L_{T_i} — глубина коррозии за время, соответствующее температуре T_i ;

V_{T_i} — скорость коррозии при температуре T_i .

В табл. 2 приведены значения скорости коррозии углеродистых сталей в анаэробных условиях в контакте с бентонитом, приведенные в литературе [53]–[57] и рассчитанные в соответствии с разработанной моделью.

Таблица 2. Значения скорости коррозии углеродистых сталей в анаэробных условиях в контакте с бентонитом

Температура, °C	pH	Скорость коррозии, мкм/год			
		Принятые ранее значения		Корректированные значения	
		Реалистичный сценарий	Консервативный сценарий	Реалистичный сценарий	Консервативный сценарий
Первый год контакта с водой (аэробная обстановка)		10–30	10–30	30–141	30–141
10	8	0,3–1	4	0,55	1
	9,5	0,3–1	1		
20	8	0,3–1	5–10	0,6	1,2
30	–	–	–	0,724	1,4
40	–	–	–	0,795	1,6
50	8,3	1–5	10–50	0,895	1,8
	8,5	1–3	10–30		
	8,7	1–1,7	10–17		
	9,2	0,1–1	1–3		
60	–	–	–	0,983	2
70	–	–	–	1,07	2
80	–	–	–	1,15	2,3
90	–	–	–	1,23	2,4
100	8,3	2–10	30–90	1,31	2,6
	8,5	2–6	10–50		
	8,7	2–4	10–30		
	9,2	1–2	3–7		
150	8,3	–	160	–	–
	8,5	–	95	–	–
	8,7	–	65	–	–
	9,2	–	20	–	–

Моделирование анаэробной коррозии стали в присутствии бентонита в растворе NaCl

В работе [43] проводилось исследование скорости коррозии УС в присутствии бентонита в 1 М растворе NaCl в течение более 5 лет, пока не были достигнуты квазистационарные условия. Наблюдается снижение скорости коррозии в ходе эксперимента до значения около 0,5 мкм/год через 5 лет. Также необходимо указать, бентонит не подвергался значительным изменениям, основной продукт коррозии — магнетит, Fe_3O_4 . На рис. 10 представлены экспериментальные результаты измерения скорости коррозии в растворе 1 моль/л NaCl в присутствии компактированного бентонита MX-80.

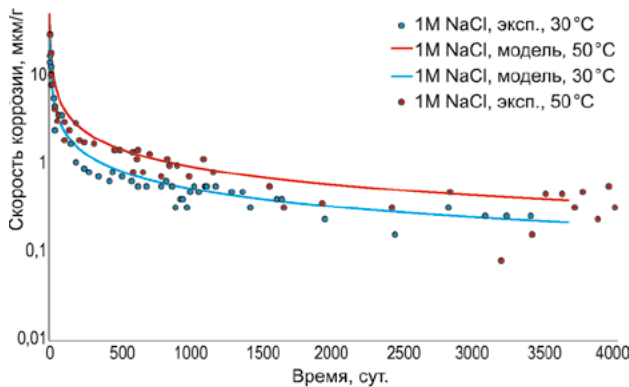


Рис. 10. Сравнение значений скорости коррозии, полученных в эксперименте и рассчитанных на основании принятой модели

Эти данные были использованы для создания модели коррозии в присутствии NaCl. В модели зависимость кинетики площадной коррозии УС от свойств среды описывалась следующим образом:

$$\frac{dL}{dt} = k \times k_{Cl} \times f_T \times e^{-\frac{E_A}{RT}} \times (1 - SR(Fe_{met})), \quad (20)$$

где dL/dt — скорость коррозии стали, моль/м²с; k — константа скорости реакции анаэробного окисления, моль/м²с, рассчитанное значение составило $2,5 \times 10^{-3}$ моль/м²с;

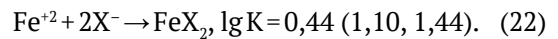
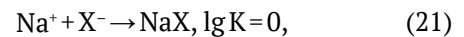
k_{Cl} — функция влияния хлорид-иона, рассчитана следующая зависимость: $k_{Cl} = 1 + 1,71 \times C_{Cl^-}$, где C_{Cl^-} — концентрация хлорид-иона, моль/л;

f_T — функция влияния температуры

E_A — энергия активации, кДж/моль (рассчитанное значение энергии активации анаэробного абиотического процесса, 23 кДж/моль);

R — универсальная газовая постоянная, Дж/моль×К; T — температура, К.

Моделирование проводилось в расчетном коде геохимического моделирования Phreeqc 2.18 при использовании термодинамической базы данных *llnl.dat*. Считалось, что весь обменный комплекс бентонита вследствие равновесия с раствором 1 моль/л NaCl представлен только Na^+ формой. Сорбция бентонитом катионов описывалась стандартными уравнениями ионного обмена (значение десятичного логарифма константы сорбции ионов железа варьировало от 0,44 до 1,44; в скобках приведены значения, использованные в уравнении (22)):



Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных представлены на рис. 10. Видно, что модель показывает удовлетворительное совпадение с экспериментом.

Финальные скорости коррозии на 10-й год моделирования составляют: 0,22 мкм/год при 30 °C; 0,40 мкм/год при 50 °C.

Отметим, что значение энергии активации 23 кДж/моль, полученное в рамках этого моделирования, близко, но несколько выше, чем значение, рассчитанное на основе экспериментов, проведенных в работе [28] (19 кДж/моль).

Предложенная модель может быть использована для оценки скорости коррозии углеродистой стали в бентонитовом окружении в анаэробных условиях.

Выводы

Описана концептуальная модель коррозии контейнера РАО из углеродистой стали в глубоком геологическом хранилище с применением бентонитового буфера. Модель учитывает различные факторы коррозии, которые могут воздействовать на контейнер в среде ПГЗРО. Некоторые процессы, такие как равномерная коррозия и локальная коррозия, специально учитываются при расчете срока службы контейнера.

Другие процессы, такие как эффекты, связанные с газовыделением, коррозионное растрескивание под напряжением, повышенная коррозия сварных швов и окисление сухим воздухом, в настоящее время исключены из оценки. Это основано на предположениях о том, что либо окружающая среда не будет поддерживать эти процессы, либо что эти механизмы коррозии можно ослабить с помощью надлежащей конструкции контейнера и процессов изготовления. Справедливость этих предположений необходимо будет проверить в будущем посредством более детальной инженерной оценки,

математического моделирования и экспериментальных исследований.

Литература

1. *Terlain A., Desgranges C., Gauvain D., Feron D., Galtayries A., Marcus Ph.* Oxidation of Materials for Nuclear Waste Containers Under Long Term Disposal. Corrosion—2001, paper 01 119 (NACE International, 2001: Houston, TX).
2. *Smailos E. et al.* Corrosion studies on selected packaging materials for disposal of heat-generating radioactive wastes in rock-salt formations. Final report 1991—1994. — Forschungszentrum Karlsruhe GmbH Technik und Umwelt (Germany). Inst. fuer Nukleare Entsorgungstechnik. № FZKA-5587. Funding organisation: Commission of the European Communities, 1995.
3. *Rebak R. B.* Selection of corrosion resistant materials for nuclear waste repositories. № UCRL-PRDC-221893. Yucca Mountain Project, Las Vegas, Nevada, 2006.
4. *Vehovar L., Tandler M.* Stainless steel containers for the storage of low and medium level radioactive waste // Nuclear engineering and design. 2001. Vol. 206. No. 1. Pp. 21—33.
5. *Werme L. O.* Fabrication and Testing of Copper Canister for Long-Term Isolation of Spent Nuclear Fuel // MRS Proceedings. 1999. Vol. 608. No. 77. DOI: 10.1557/PROC-608-77.
6. *Dunn D. S. et al.* The localized corrosion resistance and mechanical properties of alloy 22 waste package outer containers // JOM. 2005. Vol. 57. No. 1. Pp. 49—55.
7. *Druyts F., Kursten B.* Influence of chloride ions on the pitting corrosion of candidate HLW overpack materials in synthetic oxidized boom clay water // Corrosion—99. OnePetro, 1999.
8. *Бабаянц Г. И.* Использование карбида кремния для создания пеналов для долговременного хранения и захоронения ВАО и ОЯТ // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды, 2013.
9. *Rosborg B., Werme L.* The Swedish nuclear waste program and the long-term corrosion behaviour of copper // J. Nucl. Mater. 2008. No. 379. Pp. 142—153.
10. *Rasilainen K.* Localisation of the SR 97 process report for Posiva's spent fuel repository at Olkiluoto. Finland, 2004. 168 p.
11. *Wan L. et al.* Investigation on the Near Field Temperature Evolution at Domestic and Overseas Nuclear Waste Repositories // J. Radiat. Protection Bull. 2014. No. 34. Pp. 12—19.
12. *Yang C. B., Samper J., Montenegro L.* A coupled non-isothermal reactive transport model for long-term geochemical evolution of a HLW repository in clay // Environ. Geol. 2008. No. 53. Pp. 1627—1638.
13. *Kursten B., Druyts F.* Methodology to make a robust estimation of the carbon steel overpack life time with respect to the Belgian Super container design // J. Nucl. Mater. 2008. No. 379. Pp. 91—96.
14. *Zhang Q. et al.* Long term corrosion estimation of carbon steel, titanium and its alloy in backfill material of compacted bentonite for nuclear waste repository // Scientific reports. 2019. Vol. 9. No. 1. Pp. 1—18.
15. *Bennett D. G., Gens R.* Overview of European concepts for high-level waste and spent fuel disposal with special reference waste container corrosion // Journal of Nuclear Materials. 2008. Vol. 379. No. 1—3. Pp. 1—8.
16. *Carbol P., Wegen D. H., Wiss T., Fors P.* Spent Fuel as Waste Material // Comprehensive Nuclear Materials. 2012. Vol. 5. Pp. 389—420. DOI: 10.1016/b978-0-08-056033-5.00106-3.
17. *King F.* Waste Containers // Comprehensive Nuclear Materials. 2012. Vol. 5. Pp. 421—450. DOI: 10.1016/b978-0-08-056033-5.00131-2.
18. *Miller W., Alexander R., Chapman N. et al.* Geological disposal of radioactive wastes and natural analogues. — New York, Elsevier, 2000. 316 p.
19. *Smart N. R., Blackwood D. J., Werme L.* Anaerobic corrosion of carbon steel and cast iron in artificial groundwaters: part 2 — Gas generation // Corrosion. 2002. Vol. 58. No. 8. Pp. 627—637.
20. *Болдырев К. А., Соболев Д. А., Кочкин Б. Т., Баринов А. С.* Использование результатов изучения природных и исторических аналогов для оценки поведения материалов барьеров безопасности при обосновании безопасности захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2022. № 3 (20). С. 72—96. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-72-96.
21. *Соболев Д. А., Болдырев К. А.* Расчет значений предельной растворимости твёрдых минеральных фаз ряда радионуклидов для прогноза выхода радионуклидов из матриц разного состава // Труды XXI научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН. — М. : ИБРАЭ РАН, 2022. С. 88—91.
22. *Rovira M. et al.* Interaction of uranium with in situ anoxically generated magnetite on steel // Journal of hazardous materials. 2007. Vol. 147. No. 3. Pp. 726—731.
23. *Dodge C. J. et al.* Association of uranium with iron oxides typically formed on corroding steel surfaces // Environmental science & technology. 2002. Vol. 36. No. 16. Pp. 3504—3511.
24. *Seco F. et al.* Sorption of Th (IV) onto iron corrosion products: EXAFS study // Environmental Science & Technology. 2009. Vol. 43. No. 8. Pp. 2825—2830.
25. *Schütz M. K., Schlegel M. L., Libert M., Bildstein O.* Impact of iron-reducing bacteria on the corrosion rate of carbon steel under simulated geological

- disposal conditions // Environ. Sci. Technol. 2015. Vol. 49 (12). Pp. 7483–7490.
26. *Elumalai P. et al.* Influence of thermophilic bacteria on corrosion of carbon steel in hyper chloride environment // International Journal of Environmental Research. 2017. Vol. 11. No. 3. Pp. 339–347.
27. *Valencia-Cantero E., Peña-Cabriales J. J.* Effects of Iron-Reducing Bacteria on Carbon Steel Corrosion Induced by Thermophilic Sulfate-Reducing Consortia // J. Microbiol. Biotechnol. 2014. Vol. 24. No. 2. Pp. 280–286.
28. *Болдырев К. А. и др.* Исследование коррозии углеродистой стали Ст3 в присутствии микроорганизмов, выделенных из подземных вод на участке «Енисейский» // Радиоактивные отходы. 2021. No. 3 (16). Pp. 103–113. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-103-113.
29. *Pusch R.* Mobility and survival of sulphate-reducing bacteria in compacted and fully water saturated bentonite — microstructural aspects. SKB TR-99-30. Svensk Kärnbränslehantering AB, 1999.
30. *Pedersen K.* Microbial processes in radioactive waste disposal. SKB TR-00-04. Svensk Kärnbränslehantering AB, 2000.
31. *Stroes-Gascoyne S., Hamon C. J., Dixon D. A.* The effects of dry density and porewater salinity on the physical and microbiological characteristics of highly compacted bentonite. Ontario Power Generation Report No. 06819-REP-01200-10016-R00. 2006.
32. *King F.* Container materials for the storage and disposal of nuclear waste // Corrosion. 2013. Vol. 69. No. 10. Pp. 986–1011.
33. *Asano H., Aritomi M., Sawa S.* H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report 2, Repository Design and Engineering Technology, Second Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan, 2000 // Journal of Nuclear Science and Technology. 2006. Vol. 43. No. 2. Pp. 206–221.
34. *Johnson Jr A. B., Francis B.* Durability of metals from archaeological objects, metal meteorites, and native metals. № PNL-3198. — Battelle Pacific Northwest Labs., 1980.
35. *Swanton S. W., Baston G. M. N., Smart N. R.* Rates of steel corrosion and carbon-14 release from irradiated steels—state of the art review // CAST Report D. 2015. Vol. 2.
36. *Marsh G. P. et al.* An approach for evaluating the general and localised corrosion of carbon-steel containers for nuclear waste disposal // MRS Online Proceedings Library (OPL). 1986. Vol. 84.
37. *Marsh G. P., Taylor K. J.* An assessment of carbon steel containers for radioactive waste disposal // Corrosion science. 1988. Vol. 28. No. 3. Pp. 289–320.
38. *Johnson L. H., King F.* Canister options for the disposal of spent fuel. № NTB-02-11. — Paul Scherrer Institute PSI, 2003.
39. *Debruyne W. et al.* Corrosion of container and infrastructure materials under clay repository conditions. № EUR-13667. — Commission of the European Communities, 1991. 129 p.
40. *King F.* Corrosion of carbon steel under anaerobic conditions in a repository for SF and HLW in Opalinus Clay. Technical report 08-12. 2008.
41. *Lanza F., Ronsecco C.* Corrosion of low carbon steel in clay and sea sediments. № EUR-10522. — Commission of the European Communities, 1986.
42. *Simpson J. P., Wallotton P. H.* Experiments on container materials for Swiss high-level waste disposal projects. Part 3. № NAGRA-NTB-86-25. — Nationale Genossenschaft fuer die Lagerung Radioaktiver Abfaelle (NAGRA), 1986.
43. *Smart N. R. et al.* The anaerobic corrosion of carbon steel in saturated compacted bentonite in the Swiss repository concept // Corrosion Engineering, Science and Technology. 2017. T. 52. № sup1. C. 113–126.
44. *King F., Padovani C.* Review of the corrosion performance of selected canister materials for disposal of UK HLW and/or spent fuel // Corrosion Engineering, Science and Technology. 2011. Vol. 46. No. 2. Pp. 82–90.
45. *Liu T., Weyers R. W.* Modelling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures // Cement and Concrete Research. 1998. Vol. 28. Pp. 365–379.
46. *Johnson L., King F.* The effect of the evolution of environmental conditions on the corrosion evolutionary path in a repository for spent fuel and high-level waste in Opalinus Clay // Journal of Nuclear Materials. 2008. Vol. 379. No. 1–3. Pp. 9–15.
47. *Болдырев К. А. и др.* Численное моделирование выщелачивания алюмофосфатного стекла в статическом режиме в присутствии бентонита // Радиохимия. 2019. Vol. 61. No. 5. Pp. 427–432.
48. *Stănăşel O. et al.* Geochemical studies on a low-temperature geothermal well. Proceedings, Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 30–February 1, 2006. SGP-TR-179.
49. *Schmitt G., Feinen S.* Effect of anions and cations on the pit initiation in CO₂ corrosion of iron and steel. Corros. 2000. Houston (TX): NACE International, 2000, pp. 1–6.
50. *Marsh G. P., Taylor K. J., Sharland S. M., Tasker P. W.* An approach for evaluating the general and localized corrosion of carbon-steel containers for nuclear waste disposal. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1987. Vol. 84, Materials Research Society, Pittsburgh, PA. Pp. 227–238.

51. *Brondel D., Edwards R., Hayman A. et al.* Corrosion in the oil industry. Oilfield Review. 1994.
52. *Revie R. W., Uhlig H. H.* Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering. 4th ed. Hoboken. — New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2008.
53. Создание практической методологии комплексного обоснования безопасности объектов наследия, пунктов захоронения радиоактивных отходов, включая разработку и внедрение системы кодов и расчетно-прогностических комплексов. Этап 2016 г. [Текст] : отчет о НИР: 30-11 / ФГБУН ИБРАЭ РАН ; И. И. Линге; отв. исполн.: С. С. Уткин ; исполн. Д. В. Крючков [и др.]. Инв. № 4745-Н.4д.21.2.2.16.1065-3 — М., 2016. 975 с.
54. *Johnson L., King F.* The effect of the evolution of environmental conditions on the corrosion evolutionary path in a repository for spent fuel and high-level waste in Opalinus Clay // Journal of Nuclear Materials. 2008. Vol. 379. No. 1—3. Pp. 9—15.
55. Создание практической методологии комплексного обоснования безопасности объектов наследия, пунктов захоронения радиоактивных отходов, включая разработку и внедрение системы кодов и расчетно-прогностических комплексов. Этап 2017—2019 гг. ЭТАП 5 [Текст] : отчет о НИР (промежуточный): 28-08 / ФГБУ ИБРАЭ РАН ; рук. И. И. Линге ; отв. исполн.: С. С. Уткин ; исполн. Д. В. Крючков [и др.]. Инв. № 4987-Н.4д.241.20.17.1027-5-КТ. — М., 2018. 1007 с.
56. JNC, H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report 2, Repository Design and Engineering Technology (JNC, 2000).
57. *Smart N. R.* Corrosion Behavior of Carbon Steel Radioactive Waste Packages: A Summary Review of Swedish and U.K. Research // Corrosion. 2009. No. 65. Pp. 195—212.

Информация об авторе

Болдырев Кирилл Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: kaboldyrev@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Болдырев К. А. Моделирование коррозии углеродистой стали с учетом различных факторов в применении к прогнозированию срока службы контейнеров // Радиоактивные отходы. 2023. № 1 (22). С. 45—57. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-45-57.

MODELLING CARBON STEEL CORROSION CONSIDERING DIFFERENT FACTORS SEEKING TO FORECAST THE CONTAINER LIFETIME

Boldyrev K. A.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on October 19, 2022

The paper overviews the studies dealing with carbon steel corrosion under underground disposal conditions. It presents a model of carbon steel corrosion considering the impact produced by bentonite taking into account oxidation kinetics, steel surface inhibition due to its blocking by corrosion products, as well as cation sorption on the bentonite material. Under the study, the model verification was carried out based on a comparison with the literature data. The simulation showed close agreement of the calculated corrosion rates with the experimental results. The findings of the study may be used to forecast the corrosion of engineered carbon steel safety barriers.

Keywords: carbon steel, anaerobic corrosion, geochemical modeling, PHREEQC, radioactive waste.

References

1. Terlain A., Desgranges C., Gauvain D., Feron D., Galtayries A., Marcus Ph. Oxidation of Materials for Nuclear Waste Containers Under Long Term Disposal. *Corrosion—2001*, paper 01 119 (NACE International, 2001: Houston, TX).
2. Smailos E. et al. *Corrosion studies on selected packaging materials for disposal of heat-generating radioactive wastes in rock-salt formations*. Final report 1991—1994. — Forschungszentrum Karlsruhe GmbH Technik und Umwelt (Germany). Inst. fuer Nukleare Entsorgungstechnik. № FZKA-5587. Funding organisation: Commission of the European Communities, 1995.
3. Rebak R. B. *Selection of corrosion resistant materials for nuclear waste repositories*. № UCRL-PRDC-221893. Yucca Mountain Project, Las Vegas, Nevada, 2006.
4. Vehovar L., Tandler M. Stainless steel containers for the storage of low and medium level radioactive waste. *Nuclear engineering and design*, 2001, vol. 206, no. 1, pp. 21—33.
5. Werme L. O. Fabrication and Testing of Copper Canister for Long-Term Isolation of Spent Nuclear Fuel. *MRS Proceedings*, 1999, vol. 608, no. 77. DOI: 10.1557/PROC-608-77.
6. Dunn D. S. et al. The localized corrosion resistance and mechanical properties of alloy 22 waste package outer containers. *JOM*, 2005, vol. 57, no. 1, pp. 49—55.
7. Druyts F., Kursten B. Influence of chloride ions on the pitting corrosion of candidate HLW overpack materials in synthetic oxidized boom clay water. *Corrosion—99*. OnePetro, 1999.
8. Babayants G. I. Ispol'zovaniye karbida kremniya dlya sozdaniya penalov dlya dolgovremennogo khraneniya i zakhroneniya VAO i OYAT [Application of silicon carbide in the designs of canisters for long-term HLW and SNF storage and disposal]. *Bezopasnost' yadernykh tekhnologiy i okruzhayushchey sredy — Safety of Nuclear Technologies and the Environment*, 2013.
9. Rosborg B., Werme L. The Swedish nuclear waste program and the long-term corrosion behaviour of copper. *J. Nucl. Mater.*, 2008, no. 379, pp. 142—153.
10. Rasilainen K. *Localisation of the SR 97 process report for Posiva's spent fuel repository at Olkiluoto*. — Finland, 2004. 168 p.
11. Wan L. et al. Investigation on the Near Field Temperature Evolution at Domestic and Overseas Nuclear Waste Repositories. *J. Radiat. Protection Bull.*, 2014, no. 34, pp. 12—19.
12. Yang C. B., Samper J., Montenegro L. A coupled non-isothermal reactive transport model for long-term geochemical evolution of a HLW repository in clay. *Environ. Geol.*, 2008, no. 53, pp. 1627—1638.
13. Kursten B., Druyts F. Methodology to make a robust estimation of the carbon steel overpack life time with respect to the Belgian Super container design. *J. Nucl. Mater.*, 2008, no. 379, pp. 91—96.
14. Zhang Q. et al. Long term corrosion estimation of carbon steel, titanium and its alloy in backfill material of compacted bentonite for nuclear waste repository. *Scientific reports*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 1—18.
15. Bennett D. G., Gens R. Overview of European concepts for high-level waste and spent fuel disposal with special reference waste container corrosion. *Journal of Nuclear Materials*, 2008, vol. 379, no. 1—3, pp. 1—8.
16. Carbol P., Wegen D. H., Wiss T., Fors P. Spent Fuel as Waste Material. *Comprehensive Nuclear Materials*, 2012, vol. 5, pp. 389—420. DOI:10.1016/b978-0-08-056033-5.00106-3.
17. King F. Waste Containers. *Comprehensive Nuclear Materials*, 2012, vol. 5, pp. 421—450. DOI: 10.1016/b978-0-08-056033-5.00131-2.
18. Miller W., Alexander R., Chapman N. et al. *Geological disposal of radioactive wastes and natural analogues*. — New York, Elsevier, 2000. 316 p.
19. Smart N. R., Blackwood D. J., Werme L. Anaerobic corrosion of carbon steel and cast iron in artificial groundwaters: part 2 — Gas generation. *Corrosion*, 2002, vol. 58, no. 8, pp. 627—637.
20. Boldyrev K. A., Sobolev D. A., Kochkin B. T., Barinov A. S. Ispol'zovanie rezul'tatov izucheniya prirodnykh i istoricheskikh analogov dlya otsenki povedeniya materialov bar'erov bezopasnosti pri obosnovanii bezopasnosti zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov [Studies of natural and historical analogues and the use of their findings in the assessment of safety barrier behavior under the safety demonstration of radioactive waste disposal facilities]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2022, no. 3 (20), pp. 72—96. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-72-96.
21. Sobolev D. A., Boldyrev K. A. Raschot znacheniy predel'noy rastvorimosti tvordykh mineral'nykh faz ryada radionuklidov dlya prognoza vykhoda radionuklidov iz matrits raznogo sostava [Calculating the threshold solubility of solid mineral phases for a number of radionuclides to predict the release of radionuclides from waste forms of different compositions]. *Trudy XXI nauchnoy shkoly molodykh uchenykh IBRAE RAN* [Proc. Of XXI Scientific School of Young Scientists IBRAE RAS]. — Moscow, NSI RAS Publ., 2022. Pp. 88—91.
22. Rovira M. et al. Interaction of uranium with in situ anoxically generated magnetite on steel. *Journal of hazardous materials*, 2007, vol. 147, no. 3, pp. 726—731.

23. Dodge C. J. et al. Association of uranium with iron oxides typically formed on corroding steel surfaces. *Environmental science & technology*, 2002, vol. 36, no. 16, pp. 3504–3511.
24. Seco F. et al. Sorption of Th (IV) onto iron corrosion products: EXAFS study. *Environmental Science & Technology*, 2009, vol. 43, no. 8, pp. 2825–2830.
25. Schütz M. K., Schlegel M. L., Libert M., Bildstein O. Impact of iron-reducing bacteria on the corrosion rate of carbon steel under simulated geological disposal conditions. *Environ. Sci. Technol.*, 2015, vol. 49 (12), pp. 7483–7490.
26. Elumalai P. et al. Influence of thermophilic bacteria on corrosion of carbon steel in hyper chloride environment. *International Journal of Environmental Research.*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 339–347.
27. Valencia-Cantero E., Peña-Cabriaes J. J. Effects of Iron-Reducing Bacteria on Carbon Steel Corrosion Induced by Thermophilic Sulfate-Reducing Consortia. *J. Microbiol. Biotechnol.*, 2014, vol. 24, no. 2, pp. 280–286.
28. Boldyrev K. A. et al. Issledovanie korrozii uglerodistoi stali St3 v prisutstvii mikroorganizmov, vydelennykh iz podzemnykh vod na uchastke “Eniseiskii” [Research on the St3 Carbon Steel Corrosion in the Presence of Microorganisms Isolated from the Groundwater at the Yeniseiskiy Site]. *Radioaktivnye otkhody—Radioactive Waste*, 2021, no. 3 (16), pp. 103–113. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-103-113.
29. Pusch R. *Mobility and survival of sulphate-reducing bacteria in compacted and fully water saturated bentonite — microstructural aspects*. SKB TR-99-30. Svensk Kärnbränslehantering AB, 1999.
30. Pedersen K. *Microbial processes in radioactive waste disposal*. SKB TR-00-04. Svensk Kärnbränslehantering AB, 2000.
31. Stroes-Gascoyne S., Hamon C. J., Dixon D. A. *The effects of dry density and porewater salinity on the physical and microbiological characteristics of highly compacted bentonite*. Ontario Power Generation Report No. 06819-REP-01200-10016-R00. 2006.
32. King F. Container materials for the storage and disposal of nuclear waste. *Corrosion*, 2013, vol. 69, no. 10, pp. 986–1011.
33. Asano H., Aritomi M., Sawa S. H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report 2, Repository Design and Engineering Technology, Second Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan, 2000. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2006, vol. 43, no. 2, pp. 206–221.
34. Johnson Jr A. B., Francis B. *Durability of metals from archaeological objects, metal meteorites, and native metals*. № PNL-3198. — Battelle Pacific Northwest Labs., 1980.
35. Swanton S. W., Baston G. M. N., Smart N. R. *Rates of steel corrosion and carbon-14 release from irradiated steels—state of the art review*. CAST Report D. 2015. T. 2.
36. Marsh G. P. et al. An approach for evaluating the general and localised corrosion of carbon-steel containers for nuclear waste disposal. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 1986, vol. 84.
37. Marsh G. P., Taylor K. J. An assessment of carbon steel containers for radioactive waste disposal. *Corrosion science*, 1988, vol. 28, no. 3, pp. 289–320.
38. Johnson L. H., King F. *Canister options for the disposal of spent fuel*. № NTB-02-11. — Paul Scherrer Institute PSI, 2003.
39. Debruyn W. et al. *Corrosion of container and infrastructure materials under clay repository conditions*. № EUR-13667. — Commission of the European Communities, 1991. 129 p.
40. King F. *Corrosion of carbon steel under anaerobic conditions in a repository for SF and HLW in Opalinus Clay*. Technical report 08-12. 2008.
41. Lanza F., Ronsecco C. *Corrosion of low carbon steel in clay and sea sediments*. № EUR-10522. — Commission of the European Communities, 1986.
42. Simpson J. P., Wallotton P. H. *Experiments on container materials for Swiss high-level waste disposal projects. Part 3*. № NAGRA-NTB-86-25. — Nationale Genossenschaft fuer die Lagerung Radioaktiver Abfuelle (NAGRA), 1986.
43. Smart N. R. et al. The anaerobic corrosion of carbon steel in saturated compacted bentonite in the Swiss repository concept. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 2017, vol. 52, no. sup1, pp. 113–126.
44. King F., Padovani C. Review of the corrosion performance of selected canister materials for disposal of UK HLW and/or spent fuel. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 2011, vol. 46, no. 2, pp. 82–90.
45. Liu T., Weyers R. W. Modelling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures. *Cement and Concrete Research.*, 1998, vol. 28, pp. 365–379.
46. Johnson L., King F. The effect of the evolution of environmental conditions on the corrosion evolutionary path in a repository for spent fuel and high-level waste in Opalinus Clay. *Journal of Nuclear Materials*, 2008, vol. 379, no. 1–3, pp. 9–15.
47. Boldyrev K. A. et al. Chislennoye modelirovaniye vyshchelachivaniya alyumofosfatnogo stekla v staticheskom rezhime v prisutstvii bentonita [Numerical modeling of aluminophosphate glass leaching in static mode in the presence of bentonite]. *Radiokhimiya — Radiochemistry*, 2019, vol. 61, no. 5, pp. 427–432.

48. Stănăşel O. et al. Geochemical studies on a low-temperature geothermal well. *Proceedings, Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University*, Stanford, California, January 30–February 1, 2006. SGP-TR-179.
49. Schmitt G., Feinen S. Effect of anions and cations on the pit initiation in CO₂ corrosion of iron and steel. *Corros. 2000. Houston (TX): NACE International*, 2000, pp. 1–6.
50. Marsh G. P., Taylor K. J., Sharland S. M., Tasker P. W. An approach for evaluating the general and localized corrosion of carbon-steel containers for nuclear waste disposal. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 1987. Vol. 84, Materials Research Society, Pittsburgh, PA. Pp. 227–238.
51. Brondel D., Edwards R., Hayman A. et al. *Corrosion in the oil industry*. Oilfield Review. 1994.
52. Revie R. W., Uhlig H. H. *Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering*. 4th ed. Hoboken. — New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2008.
53. *Sozdaniye prakticheskoy metodologii kompleksnogo obosnovaniya bezopasnosti ob'yektov naslediya, punktov zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov, vklyuchaya razrabotku i vnedreniye sistemy kodov i raschetno-prognosticheskikh kompleksov. Etap 2016 g* [Development of a practical methodology for a comprehensive safety assessment of legacy facilities, radioactive waste disposal facilities, including the development and implementation of a system involving computer codes and calculation and forecasting packages. Stage 2016]. [Text]: R&D report: 30-11 / FGBUN IBRAE RAN [Nuclear Safety Institute of RAS]; I. I. Linge; principal investigator S. S. Utkin; research performed by D. V. Kryuchkov [et al.]. Inv. No.4745-N.4d.21.2.2.16.1065-3. — Moscow, 2016. 975 p.
54. Johnson L., King F. The effect of the evolution of environmental conditions on the corrosion evolutionary path in a repository for spent fuel and high-level waste in Opalinus Clay. *Journal of Nuclear Materials*, 2008, vol. 379, no. 1–3, pp. 9–15.
55. *Sozdaniye prakticheskoy metodologii kompleksnogo obosnovaniya bezopasnosti ob'yektov naslediya, punktov zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov, vklyuchaya razrabotku i vnedreniye sistemy kodov i raschetno-prognosticheskikh kompleksov. Etap 2017–2019 gg. ETAP 5* [Development of a practical methodology for a comprehensive safety assessment of legacy facilities, radioactive waste disposal facilities, including the development and implementation of a system involving computer codes and calculation and forecasting packages. Stage 2017–2019 STAGE 5] [Text]: R&D Report (intermediate): 28-08 / FGBU IBRAE RAN; project head manager I. I. Linge; principal investigator: S. S. Utkin; research performed by D. V. Kryuchkov [et al.]. Inv. No. 4987-H.4d.241.20.17.1027-5-KT. — Moscow, 2018. 1007 p.
56. *JNC, H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan*, Supporting Report 2, Repository Design and Engineering Technology (JNC, 2000).
57. Smart N. R. Corrosion Behavior of Carbon Steel Radioactive Waste Packages: A Summary Review of Swedish and U.K. Research. *Corrosion*, 2009, no. 65, pp. 195–212.

Information about the author

Boldyrev Kirill Aleksandrovich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsкая st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: kaboldyrev@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Boldyrev K. A. Modelling carbon steel corrosion considering different factors seeking to forecast the container lifetime. *Radioactive Waste*, 2023, no. 1 (22), pp. 45–57. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-45-57. (In Russian).