

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЫ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛА ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ НЕФТЯНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

Валерий Макаренко, Константин Муравьев, Танзания Евпак, Николай Каливошко

Національний університет біоресурсів і природопольовання України

Україна, г. Київ, ул. Героїв Оборони, 15

Valery Makarenko, Konstantin Muravyev, Tanzania Yevpak, Nicholas Kalivoshko

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Str. Heroiv Oborony, 15, Kiev, Ukraine

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований трещиностойкости нефтяных резервуаров.

Ключевые слова: Трещиностойкость, коррозия, резервуары, нейросеть.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Большая часть эксплуатируемых в настоящее время резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов построена 20-30 лет назад. По продолжительности эксплуатации парка резервуаров наблюдается следующая динамика: до 10 лет – 24,5%; от 10 до 15 лет – 27,2%; от 16 до 20 лет – 33,3%; от 21 до 25 лет – 5,4%; от 26 до 30 лет – 9,5%;

Как показывают результаты мониторингового анализа, нормативный срок 20 лет эксплуатации превысил 14,9% резервуара.

Анализ динамики старения резервуарного парка свидетельствует, что к 2020 году срок эксплуатации 90% резервуаров превысит нормативный, поэтому уже сейчас необходимо принимать экстренные меры по восстановлению эксплуатационной пригодности большей части существующего резервуарного парка.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Известно, что практически вся нефть, добываемая в Украине, транспортируется подразделениями АК «Укрнафгаз». Поэтому технологический процесс перекачки нефти в таких количествах предполагает наличие большого объема резервуарных емкостей.

Несмотря на снижение объемов перекачки в последнее время, вызванное

сокращением добычи нефти, основная часть резервуарного парка продолжает активно эксплуатироваться. Наличие большого запаса резервуарных емкостей позволяет в новых экономических условиях получать дополнительные прибыли от товаротранспортных операций и дает преимущества в сферах управления и принятия решений руководством компаний и фирм. Поэтому вопросу обеспечения эксплуатационной надежности резервуарных парков в настоящее время уделяется большое внимание. Из анализа литературных данных [5-9, 11-22] и результатов многочисленных наблюдений авторов данного исследования можно заключить, что к основным причинам разрушения резервуаров, эксплуатируемых на территории Украины, можно отнести коррозионный износ днища, низкая коррозионная трещиностойкость нижних поясов вертикальной стенки резервуаров, заводские и монтажные дефекты.

К коррозионным повреждениям относится коррозия сварных соединений и основного металла, сильно проявляющаяся под действием циклических и вибрационных нагрузок. Поэтому становится очевидным необходимость в изучении коррозионной трещиностойкости резервуарных сталей при изменении напряженно – деформированного состояния вертикальных стальных резервуаров (РВС) в условиях воздействия коррозионно-активных сред, переменных нагрузок и минусовых температур.

Кроме того, многочисленные исследования изменений прочностных свойств металлоконструкций после 20 лет эксплуатации показали практически полное их постоянство. Следует обратить внимание на то, что хотя запас надежности РВС насто-

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЫ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛА ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ НЕФТЯНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

лько велик (известны случаи, когда резервуары безаварийно эксплуатировались более 20 лет имея как заводские, так и монтажные дефекты), однако в связи с ухудшением качества изготавливаемой резервуарной стали и транспортируемых эксплуатационных продуктов, однако вопросы коррозионной трещиностойкости металла сварных швов и основной стали имеют право на существование и дополнительное изучение.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование влияния коррозионной среды на трещиностойкость резервуарных сталей, находящихся в длительной эксплуатации, с применением нейросетевого метода анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследования служила резервуарная легированная сталь марки ВСт.Зсп (ГОСТ 380–88), эксплуатируемая 3, 15 и 25 лет, фрагменты которой вырезали из демонтируемых резервуаров. Для сравнения использовали неэксплуатируемую сталь такой же марки, химический состав которой равен (в %): С 0,18; Мн 0,16; Si 0,23; S 0,039; P 0,037; Cr 0,28; Ni 0,25; Cu 0,26.

Механические свойства стали: $\sigma_B = 460$ МПа; $\sigma_T = 240$ МПа; $\delta = 26\%$; КСУ = 69 Дж/см² ($t = +20^\circ\text{C}$); КСУ = 29 Дж/см² ($t = -20^\circ\text{C}$).

Коррозионную трещиностойкость исследовали согласно стандарта NACE TM 01 – 77 (90), метод А, на цилиндрических образцах диаметром рабочей части 3 мм, что позволяла толщина листов стенки резервуара. Испытывали образцы на установке УСМР – 6 под нагрузкой, составляющей $0,8\sigma_{0,2}^{\min}$ (в каждом эксперименте использовали по 3 образца). При этом определяли пороговые значения показателя коррозионной трещиностойкости σ_{ssc} для того, что бы сравнить качество сталей разных сроков эксплуатации. Условия испытаний по этому стандарту следующие:

продолжительность – 720 ч в растворе подтоварной воды (рН 6,4) с добавлениями: $C_{Cl^-} = 5...80$ мг/л; $C_{O_2} = 5...50$ мг/л. Выбранные хлорсодержащие растворы позволили получить данные о зависимости коррозионной трещиностойкости резервуарных сталей от совместного содержания в подтоварной воде входящих в её состав указанных компонентов. При этом температура испытаний составляла $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Параметр σ_{ssc} определяли из зависимостей $\sigma_i - \lg\tau$ (σ_i – начальное нагружение; τ – время до разрушения, ч), при которых образцы не разрушаются на принятой временной базе испытаний.

Зависимости $\sigma_i - \lg\tau$ строили по минимальным значениям времени до разрушения под каждой нагрузкой, поскольку использование средних значений τ недопустимо ввиду необходимости гарантированной работоспособности резервуарных конструкций в технологических средах с хлор-анионами и кислородом.

Учитывая большое разнообразие, значительный объем и, зачастую, противоречивость информации о механических и коррозионных повреждениях, назрела острая необходимость в поиске новых методов её эффективного анализа. Решение этой задачи связано с новыми информационными технологиями, важное место среди которых занимают искусственные нейронные сети (ИНС) [1].

Из работ известно [2, 3, 4], что метод нейросетевого моделирования применим к изучению коррозионных процессов, которые в большинстве своем представляют как многофакторные системы, характеризующиеся совокупностью коррозионно-механических параметров (критерии трещиностойкости, работа зарождения и распространения трещины, прочностные и вязко-пластические показатели), нелинейно изменяющихся с изменением параметров среды (концентрация, анионный состав, температура, рН, химический состав стали и др.). В настоящей работе впервые предпринята попытка создания и обучения ИНС на основе ограниченного набора

экспериментальных данных с целью получения недостающих сведений для корректного прогнозирования коррозионно – механического поведения резервуарной стали ВСт.3сп, как наиболее распространенной в строительстве резервуаров, в близких к нейтральным хлоридных средах, содержащих коррозионно–активный компонент – растворенный кислород. Нейронные системы должны предсказывать характеристические критерии трещиностойкости стали в коррозионно–активных средах по любому набору параметров среды: концентрация анионов и кислорода, и идентифицировать состояние коррозионной системы (стабильно высокое или низкое сопротивление трещиностойкости) по предсказанным критериям.

В данной работе использовали ИНС с одним выходом, т.е. её структура включает (рис. 1): 1 – слой нейронов – рецепторов (входной слой), осуществляющий прием информации извне; 2 – слой ассоциативных нейронов (скрытый); 3 – слой выходных нейронов, формирующих реакцию сети на внешний стимул.

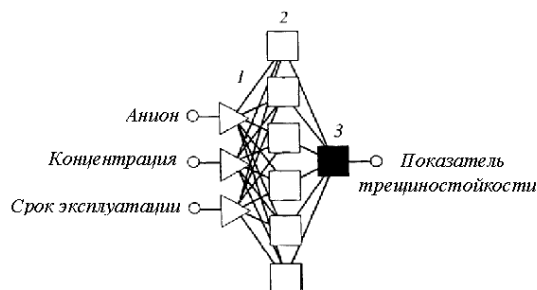


Рис. 1. Структура ИНС для показателя коррозионной трещиностойкости σ_{ssc} (слой нейронов: 1 – входной; 2 – скрытый; 3 – выходной)

Fig. 1. Structure of ANN for the index of corrosive splitdurability

Из литературы [2, 3] известно, что, как правило, одного скрытого слоя достаточно для решения подобных задач.

Для выбора оптимального числа нейронов в скрытом слое ИНС использовали в соответствии с рекомендациями работы [4] нейрогенетический алгоритм, который обеспечивает быстрый поиск оптимальной

структуры [10]. Для исследуемого критерия трещиностойкости анализировали 25 вариантов сети.

На предварительном этапе при обучении выбранной ИНС, выбор экспериментальных данных случайным образом разделялся на подмножество – обучающее (70% данных используется непосредственно для обучения) и тестовое (30% данных используется для контроля способности ИНС к обобщению информации).

Обучение ИНС состояло из нескольких циклов, на каждом из которых определялась ошибка наборов экспериментальных данных в обучающем и тестовом подмножестве по отношению к результатам, полученным с использованием ИНС. При этом оценивали не только абсолютную величину ошибки, но и тенденцию её изменения в процессе обучения сети. Обучение прекращали в случае достижения минимума ошибки на тестовом подмножестве. Выбор алгоритма обучения определяли, в основном, быстротой достижения и качеством оптимальных параметров обучения ИНС.

Созданные ИНС были реализованы с помощью пакета Statistica Neural Network. С использованием обученных ИНС были получены обобщенные зависимости критериев трещиностойкости стали ВСт.3сп от параметров раствора и на их основе выполнен инженерный прогноз деформационного поведения резервуарных сталей.

С помощью Visual Basic обученные ИНС интегрировали в Excel в виде программных модулей, что позволило быстро анализировать большие массивы данных и визуализировать результаты работы ИНС стандартными средствами без разработки интерфейса пользователя и системы “ввода – вывода” данных.

Результаты экспериментальных исследований стали (рис. 2–4) ВСт.3сп в средах с различными концентрациями хлорид – ионов и кислорода получены в ограниченном диапазоне условий и сроков эксплуатации резервуаров, что не позволяет провести масштабный анализ зависимостей критерия трещиностойкости от параметров раствора..

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЫ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛА ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ НЕФТЯНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

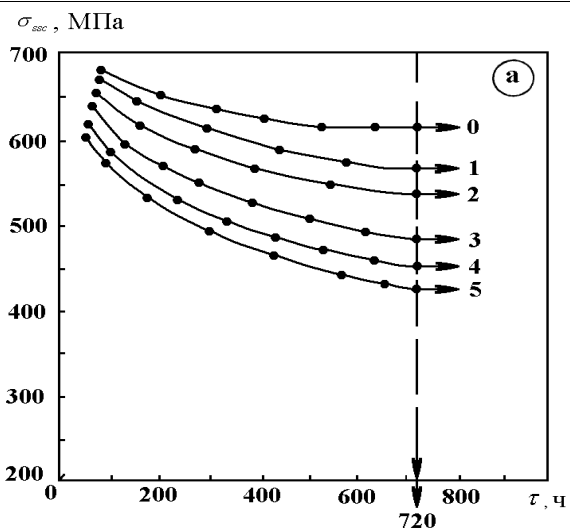


Рис. 2. Графики зависимости показателя коррозионной трещиностойкости σ_{ssc} от концентрации кислорода в модельной среде

Fig. 2. Charts of dependence of index of corrosive splitdurability σ_{ssc} from the concentration of oxygen in a model environment

Сталь резервуарная не эксплуатировалась. Цифровые обозначения: 0 – 5 мг/л O_2 ; 1 – 10 мг/л O_2 ; 2 – 20 мг/л O_2 ; 3 – 30 мг/л O_2 ; 4 – 40 мг/л O_2 ; 5 – 50 мг/л O_2 . Разброс значений σ_{ssc} не превышает $\pm 10 - 12\%$

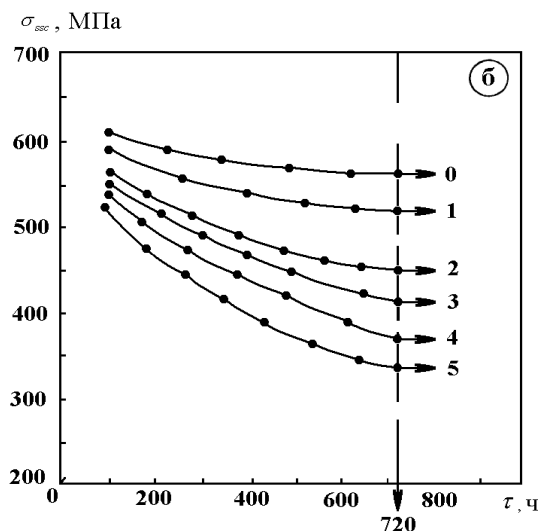


Рис. 3. Графики зависимости показателя коррозионной трещиностойкости σ_{ssc} от концентрации кислорода в модельной среде

Fig. 3. Charts of dependence of index of corrosive splitdurability σ_{ssc} from the concentration of oxygen in a model environment

Сталь резервуарная эксплуатировалась 15 лет. Цифровые обозначения: 0 – 5 мг/л O_2 ; 1 – 10 мг/л O_2 ; 2 – 20 мг/л O_2 ; 3 – 30 мг/л O_2 ; 4 – 40 мг/л O_2 ; 5 – 50 мг/л O_2

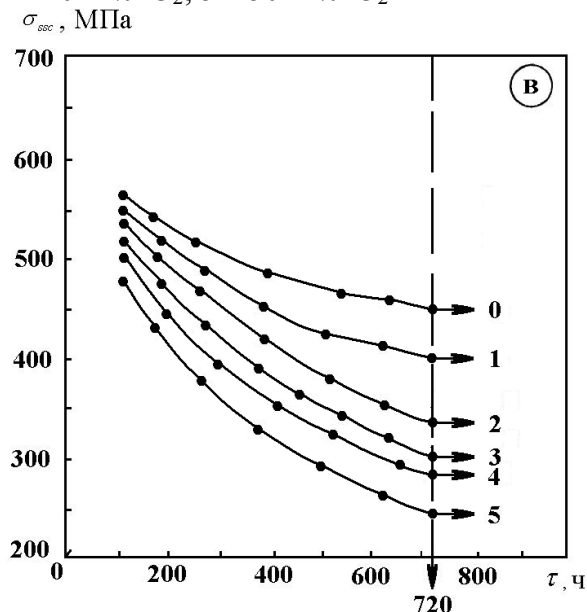


Рис. 4. Графики зависимости показателя коррозионной трещиностойкости σ_{ssc} от концентрации кислорода в модельной среде

Fig. 4. Charts of dependence of index of corrosive splitdurability σ_{ssc} from the concentration of oxygen in a model environment

Сталь резервуарная эксплуатировалась 25 лет. Цифровые обозначения: 0 – 5 мг/л O_2 ; 1 – 10 мг/л O_2 ; 2 – 20 мг/л O_2 ; 3 – 30 мг/л O_2 ; 4 – 40 мг/л O_2 ; 5 – 50 мг/л O_2 . Графические зависимости критерия коррозионной трещиностойкости σ_{ssc} от содержания химически агрессивных ингредиентов экспериментальной среды НАСЕ, приведенные на рис. 2–7, показали, что с повышением содержания в испытываемой модельной среде таких компонентов, как хлор-ионы и кислород, трещиностойкость резервуарной стали снижается, причем низкой сопротивляемостью образованию трещин характеризуются стали, эксплуатируемые более 5 лет. Наиболее низкие коррозионно-механические свойства характерны для сталей с длительным сроком эксплуатации нефтяных резервуаров, в частности, более 15 лет. Полученные результаты экспериментальных коррозионно-механических испытаний выявили очевидное наличие

определенно нелинейных связей между переменными. Поэтому для исследования симбатно изменяющихся зависимостей между показателем коррозионной трещиностойкости σ_{ssc} и концентрацией в модельной среде коррозионно-активных компонентов использовался метод нейросетевого анализа полученных результатов экспериментальных исследований.

Известно [2 – 4], что структура и методы обучения ИНС зависят от качественного массива экспериментальных данных, подаваемых на входы ИНС, и сложности изучаемых коррозионных процессов. Результаты компьютерных экспериментов по выбору структуры ИНС и ее последующему обучению позволили выбрать оптимальное число нейронов в скрытом слое, причем ошибка обучения и тестирования выбранной структуры ИНС, несмотря на различный алгоритм обучения, несущественно

отличается при анализе критерия трещиностойкости (табл. 1).

Обученные ИНС использовали для прогнозирования σ_{ssc} как внутри области экспериментально апробированных параметров, так и за ее пределами. Как видно из рис. 6, показатель σ_{ssc} сложным образом зависит от концентрации хлор – аниона и кислорода в испытываемой среде, но тем не менее возможно проследить некоторые общие закономерности.

Так, (рис. 2) при совместном увеличении концентрации хлор – аниона и кислорода в растворе резко снижается коррозионная трещиностойкость резервуарной стали.

Особенно это четко наблюдается для сталей, вырезанных из демонтированных резервуаров, эксплуатируемых довольно продолжительное время – 15 и 25 лет.

Таблица 1. Оптимальные параметры ИНС для прогнозирования критерия коррозионной трещиностойкости и ошибка ИНС при обучении и тестировании

Table 1. Optimum parameters of ANN for prognostication of criterion of corrosive splitdurability and error of ANN at teaching and testing

Критерий трещиностойкости на выходе сети	Количество нейронов в скрытом слое сети	Ошибка обучения сети	Ошибка тестирования сети	Алгоритм обучения	Число циклов обучения
σ_{ssc}	6	0,0071	0,0422	ЛМ	350
	6	0,0054	0,0374	ССГ	285

Примечание: ЛМ – Левенберга – Маркара; ССГ – спуск по сопряженным градиентам.

Таблица 2. Влияние концентрации аниона хлора и кислорода на показатель трещиностойкости резервуарной стали ВСт.3сп

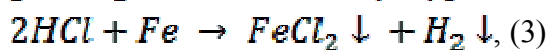
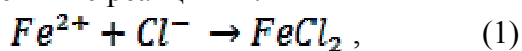
Table 2. Influence of concentration of anion of chlorine and oxygen on the index of splitdurability of reservoir steel of VSt.3sp

Параметр	Входные переменные			
	Обучение		Тестирование	
	концентрация		концентрация	
	Cl^-	O_2	Cl^-	O_2
Ранг	2	1	2	1
Ошибка	0,074	0,195	0,052	0,131
Отношение	11,237	22,315	2,286	4,712

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЫ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛА ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ НЕФТЯНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

Эти данные хорошо согласуются с результатами исследований отечественных [5, 7–9] и зарубежных [6] авторов.

Известно [7], что при контакте листовой резервуарной стали с подтоварной водой, находящейся в нижней части резервуара, протекает хлоридно-кислотная коррозия. Так, ионы Cl^- , присутствующие в значительных количествах в подтоварной воде, ускоряют процесс ионизации железа и интенсифицируют развитие локальной коррозии по границам кристаллов (что и провоцирует зарождение от питтингов микротрещин под напряжением) в соответствии с реакциями:



Продукты реакции (1)–(5), обнаруженные на внутренней поверхности нижних участков эксплуатируемых резервуаров, полученные с применением фазового рентгеноструктурного анализа, подтверждают механизм, основную роль в котором играют ионы Cl^- .

Из работы [9] известно, что концентрация растворенного кислорода в смеси оказывает существенное влияние на скорость коррозии лишь при температурах до 40...80 °С. Механизм взаимодействия стали с кислородом в присутствии водной среды описывается, в общем случае, следующим уравнением:



При этом образование карбонатно – оксидных продуктов коррозии тесно связано с анодным растворением металла.

Взаимодействие металла с кислородом возможно и по другим механизмам, однако рассмотрение их не входило в задачу настоящего исследования.

ВЫВОДЫ

Экспериментально установлено, что с повышением содержания в испытываемой модельной среде таких компонентов, как

хлор-ионы и кислород, трещиностойкость резервуарной стали снижается, причем низкой сопротивляемостью образованию трещин характеризуются стали, эксплуатируемые более 5 лет. Наиболее низкие коррозионно-механические свойства характерны для сталей с длительным сроком эксплуатации нефтяных резервуаров, в частности, более 15...20 лет. Полученные результаты экспериментальных коррозионно-механических испытаний выявили очевидное наличие определенно нелинейных (симбатных) связей между переменными, для анализа которых использовался нейросетевой метод.

С использованием метода нейросетевого моделирования установлено, что в близких к нейтральным хлоридных средах характер растворения низкоуглеродистых сталей в большей мере обусловлен кислотностью раствора, чем концентрацией хлорид-анионов – активаторов коррозионного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Uosserman F. 1992: Neyrokompyuternaya tekhnika: Teoriya i praktika. – М.: Mir. – 183.
2. Gorban A.N. 1991: Obucheniye neyronnykh setey. – М.: SP “ParaGraf”. – 156.
3. Gorban A.N., Dunin – Barkovskiy V.L., Kipdin A.N. i dr. 1998: Neyroinformatika. Novosibirsk: Nauka, Sibirskoye otdeleniye RAN. – 296.
4. Neyronnyye 2000: Neyronnyye seti v Statisticheskoy Neural Network / Per. s angl. – М.: Goryachaya liniya – Telekom. – 182.
5. Moiseyeva L.S. 2005: Uglekislotnaya korroziya neftegazopromyslovogo oborudovaniya. – Zashchita metallov. – t. 41. - №1. – 82 – 90.
6. Vengertsev Yu.O., Globa V.M., Martinyuk T.A. 1996: Zasobi pidvishchennya ekspluatatsiyoi nadiynosti stalevikh rezervuariv // Naftova i gazova promislovist. – №4. – 47 – 48.
7. Verevkin S.N., Rzhavskiy Ye.L. 1980: Povysheniye nadezhnosti rezervuarov, gazgolderov i ikh oborudovaniya. – М.: Nedra. – 248.
8. Prokhorov V.A. 1998: Razrusheniye rezervuarov i ikh ushcherb v usloviyakh Severa // Problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh situatsiyakh. – Yakutsk: YaGU. – 7 – 16.

9. Makarenko V.D. 2006: Nadezhnost neftegazopromyslovogo oborudovaniya. Chelyabinsk: Izd – vo TsNTI. – 826.
10. Makarenko V.D., Sinkevichyus A.A., Belyayev V.A. i dr. 2008: Neyrosetevoy analiz tekhnologicheskikh svoystv materialov. – Nizhnevartovsk: Izd – vo Nizhnevartovskogo gos. gumanit. un – ta. – 168.
11. Burenin V.A. 1994: Prognozirovaniye individualnogo ostatochnogo resursa stalnykh vertikalnykh rezervuarov: Diss. dokt. tekhn. nauk. – Ufa. – 270.
12. Galejev V.B. 1987: Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye rezervuarov postroyennykh na slabykh pereuvlazhennnykh gruntakh: Diss. dok. tekhn. nauk. – Tyumen. – 668.
13. Burenin V.A. 1980: Issledovaniye vliyaniya neravnomernykh osadok na napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye stalnoye vertikalnogo tsilindricheskogo rezervuara: Diss. kand. tekhn. nauk. – Ufa. – 157.
14. Daychik M.L., Grigorovskiy N.I., Khurshudov G.Kh. 1989: Metody i sredstva naturnoy tenzometrii: – M.: Mashinostroye-niye.– 234.
15. Ivanov Yu.K., Konovalov P.A., Mangusheva R.A. i dr. 1989: Osnovaniya i fundamenty rezervuarov. – M.: Stroyizdat. – 95.
16. Isima T. 2005: Issledovaniye prichin avariyy pri khraneniі nefti v rezervuarakh na predpriyatikh firmy “Mitsubisi Sekiyu” // Perevod s yaponskogo yazyka iz zhurnala “Doboku Seko”. – t.16, №9. – 93 – 94.
17. Rozenshteyn I.M. 1985: Avariі i nadezhnost stalnykh rezervuarov. – M.: Nedra. – 253.
18. Slepnev I.V. 1988: Napryazhenno-deformirovannoye uprugo-plasticheskoye sostoyaniye stalnykh vertikalnykh tsilindricheskikh rezervuarov pri neravnomernykh osadkakh osnovaniy: Diss. kand. tekhn. nauk. – M.: MISI. – 225.
19. Tarasenko A.A., Prokofyev V.V. 1997: Metody remonta elementov konstruksiy stalnykh vertikalnykh tsilindricheskikh rezervuarov posle dlitelnoy ekspluatatsii // Vedomstvennaya instruktsiya AOOT “Sibnefteprovod”. – Tyumen.
20. Tarasenko A.A., Prokofyev V.V. 1997: Elektronnyy uchebnik “RemontRVS” na SD-nositele SD disk. – Tyumen: TyumGNGU. – 640 Mb.
21. Fedorova Zh.A. 1969: Analiz obsledovaniy rezervuarov na ploshchadke Sokur // Tr. UNI / Proyektirovaniye i stroitelstvo, vyp. 3. – Ufa. – 254 – 258.
22. Yamamoto S., Kavano K. 2006: Rassledovaniye prichiny avariі neftekhрани-lіshcha San-Diyego, Kaliforniya.
23. Litvinov O. 2006: K dinamicheskomu rasschetu mashin / Oleg Litvinov, Wojciech Tanas // Motrol. Tom 2A. – Lublin – 210 – 213.
24. Loveykin V.S., Chovnyuk Yu.V., Yavorskaya A.V., Kostyna O.Yu. 2010: Vzaimodeystviye glinistykh mineralov, donnykhmorskikh osadkov,ikh vodnykh nanodespersnykh smesey s KVCh-elektromagnitnymi izlucheniymi // Motrol.Tom 12B. – Lublin – 54-64.

**RESEARCH OF INFLUENCE OF
CORROSION ENVIRONMENT ON
CRACK RESISTANCE OF METAL OF
OPERATED OIL TANKS**

Summary. Results of experimental researches of crack resistance of oil tanks are given.

Key words: crack resistance, corrosion, tanks, neuronet.