

УДК 621.791.01.669

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ РЕЗЕРВУАРНОЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВОГО АНАЛИЗА

В статье представлены наиболее значимые причины отказа стальных резервуаров. Выделен фактор коррозионного износа, как один из самых важных в процессах деградации резервуарной стали. Показана возможность применения нейросетевого анализа для прогнозирования характера трещиностойкости низкоуглеродистой стали, предназначенной для изготовления нефтяных резервуаров. С использованием метода нейросетевого анализа определены области коррозионно-механической трещиностойкости резервуарной стали.

This article presents the most significant reasons for the failure of steel tanks. Identified the factor of corrosion wear as one of the most important factors in the tank steel degradation. The paper shows the possibility of using neural network analysis to predict the nature of crack resistance of low-carbon steel intended for the manufacture of oil reservoirs. Using the neural network analysis method, the areas of corrosion and mechanical crack resistance of reservoir steel were determined.

**Ключевые слова:** трещиностойкость, резервуарная сталь, нейросетевой анализ, коррозия.

Известно, что организация качественного и бесперебойного технологического процесса переработки большого количества нефти предполагает наличие значительных объемов резервуарных емкостей [1, 5–8]. Несмотря на снижение объемов перекачки, вызванное сокращением добычи нефти, основная часть резервуарного парка продолжает активно эксплуатироваться. Наличие в достаточных объемах запаса резервуарных емкостей позволяет в новых экономических условиях получать дополнительную прибыль от товаротранспортных операций и дает преимущества в сферах управления и принятия решений руководством нефтедобывающих, транспортирующих и перерабатывающих компаний и фирм. Поэтому вопросам обеспечения эксплуатационной надежности резервуарных парков придается важное значение.

В настоящее время нормативный срок эксплуатируемых резервуаров уже превышен или близок к предельному. Например, распределение резервуаров, эксплуатируемых НАК «Укрнафтогаз», по продолжительности эксплуатации имеет следующий вид: на 01.01.2010 г.: со сроком эксплуатации менее 10 лет – 40 %; 10–20 лет – 28 %; 20–30 лет – 24 %; более 30 лет – 8 %; на 01.01.2017 г.: менее 10 лет – 6 %; 10–20 лет – 43 %; 20–30 лет – 41 %; более 30 лет – 10 %.

Нормативный срок эксплуатации 20–30 лет для резервуаров в отечественных нормативах был установлен исключительно из экономических соображений [2–3]. Однако, известны случаи многолетней безаварийной работы резервуаров, построенных еще по проектам В.Г. Шухова в 1978 г. и в более позднее время. Металлографические исследования резервуарных сталей после длительной эксплуатации показали незначительные изменения в их свойствах [4]. Анализ стандартов



**С.Ю. Максимов**

старший научный сотрудник, зав. отделом «Физико-механические исследования свариваемости конструкционных сталей» Института электросварки имени Е.О. Патона Национальной академии наук Украины, д.т.н.



**В.Д. Макаренко**

профессор кафедры нефтегазовой инженерии и технологий Национального университета «Полтавская политехника имени Юрия Кондратюка», д.т.н., профессор



**Ю.Л. Винников**

профессор кафедры нефтегазовой инженерии и технологий Национального университета «Полтавская политехника имени Юрия Кондратюка», д.т.н., профессор



**К.В. Чичулина**

доцент кафедры экономики, предпринимательства и маркетинга, глава Рады молодых ученых Национального университета «Полтавская политехника имени Юрия Кондратюка», лауреат государственной премии Президента Украины для молодых ученых, к.т.н.

Американского нефтяного института [5, 6] также показал, что такое понятие, как нормативный срок эксплуатации резервуаров в них отсутствует. С 1996 г. Гостехнадзор Украины ввел новый порядок аттестации резервуаров, исчерпывающих свой нормативный срок эксплуатации. Таким образом, теоретически срок эксплуатации резервуаров теперь не ограничивается. С увеличением срока службы сокращаются промежутки его освиде-

тельствования и ужесточаются требования к оценке индивидуального остаточного ресурса.

Проанализировав динамику старения резервуарного парка, можно сделать вывод, что к 2030 г. срок эксплуатации примерно 90 % резервуаров превысит нормативный, поэтому уже сейчас необходимо принимать экстренные меры по восстановлению эксплуатационной пригодности большей части существующего резервуарного парка [5–7].

Согласно литературным данным [5–8] и результатам многолетних наблюдений авторов данного исследования к основным причинам разрушения резервуаров можно отнести: коррозионный износ днища, низкую коррозионно-механическую трещиностойкость нижних поясов вертикальной стенки резервуаров, заводские и монтажно-сварочные дефекты.

К коррозионным повреждениям относится коррозия сварных соединений и основного металла, сильно проявляющаяся под действием циклических и вибрационных нагрузок. Поэтому становится очевидной необходимость изучения коррозионно-механической трещиностойкости резервуарных сталей при изменении напряженно-деформированного состояния РВС в условиях воздействия коррозионно-активных сред и минусовых температур.

Существующие научно-технические и конструкторско-технологические разработки в области повышения безопасного эксплуатационного ресурса промышленных резервуаров и трубопроводов обнаруживают противоречия и неопределенность, отсутствие количественных научно обоснованных практических рекомендаций по оптимальному выбору резервуарных сталей и способов их защиты от коррозионных повреждений применительно к изменившимся условиям эксплуатации металлоконструкций, необходимость комплексного и системного изучения природы и механизмов коррозионных процессов и определения оптимальных антикоррозионных и инженерно-технических мер при сооружении и эксплуатации стальных резервуаров и трубопроводов.

Известно [15–17], что в процессе длительной эксплуатации существенно изменяются механические характеристики эксплуатируемых конструкций в связи с усталостью металла, вызванной его сероводородной деградацией.

Не решенной проблемой остается необходимость разработки расчетно-экспериментальных методов оценки остаточного рабочего ресурса

нефтяного оборудования с учетом деградации резервуарной стали в процессе длительной эксплуатации. Однако, следует отметить, что большой объем экспериментального материала и, зачастую, противоречивость информации по коррозионному разрушению, полученной с помощью традиционных методик, приводит к необходимости поиска новых, альтернативных методов ее эффективного анализа. Задачи оценки и прогнозирования коррозионного поведения сталей являются ключевыми в общей проблеме управления эксплуатационной надежностью нефтяных резервуаров. Возможности их решения заключаются в применении новых информационных технологий, составной частью которых являются интеллектуальные средства обработки информации, такие как искусственные нейронные сети (ИНС), которые позволяют создать качественно новые аппаратные и программные средства, существенно расширяющие классы решаемых задач и повышающие эффективность анализа и прогнозирования.

**Задачи исследования.** В работе исследуется трещиностойкость резервуарной стали с переменным содержанием модифицирующей микродобавки церия с применением нейросетевого анализа.

Объектом исследования служила резервуарная низкоуглеродистая сталь марки ВСтЗсп (ГОСТ 380-88), в процессе выплавки которой добавляли церий. Интерес к использованию этого редкоземельного элемента вызван тем, что он обладает рядом свойств, реализация которых на практике позволила бы, на наш взгляд, существенно улучшить механические свойства стали и в целом трещиностойкость резервуарных конструкций.

Модифицирующие добавки находились в порошкообразном металлическом виде; химический и гранулометрический состав их соответствовал ГОСТам и ТУ, приведенным в работе [8]. Стальные слитки выплавляли в индукционной высокочастотной печи (базовая сталь – ВСтЗсп). В процессе выплавки в расплавленную ванну добавляли церий, но в каждом случае требуемый химический состав (степень раскисления) опытных сталей корректировали дополнительным введением ферросплавов – ферромарганца и ферросилиция. Из полученных слитков изготавливали образцы для испытаний. Переменное содержание серы (от 0,011 % до 0,050 %) регулировали за счет добавки в ванну окислы, ржавчины, ферросплавов и введения марганца металлического.

Изготовленные образцы подвергали механическим испытаниям, в частности, определяли следующие параметры трещиностойкости: критическую интенсивность напряжений  $K_{IC}$ , характеризующую сопротивляемость металла хрупкому разрушению [9]. Кроме этого определяли ударную вязкость на образцах с надрезом по Шарпи ( $KCV$ ) [10].

Для определения характеристик  $K_{IC}$  и  $KCV$  готовили образцы требуемых размеров [9, 10]. Усталостные трещины в образцах создавали с помощью гидропульсатора CDM-10 (Германия) при частоте нагружения 10...15 Гц и коэффициенте асимметрии цикла  $r = 0,1...0,2$ . Испытания с целью определения параметров вязкости разрушения проводили на установке модели «Инстрон» (Великобритания) по стандартным методикам [10].

Для изучения процесса разрушения использовали призматические образцы размером 120 20 12 мм, у которых посередине длины механическим способом наносили один краевой полукруглый надрез типа Менаже глубиной 1 мм в плоскости, перпендикулярной к действию главного напряжения при изгибе образца. Образцы испытывали при 20 °С в жестком режиме нагружения изгибом до заданных начальных амплитуд деформаций  $E_a = 0,4\%$  и  $0,7\%$  с трапециoidalной формой цикла. Длительность полупериода растяжения составляла 24 ч, продолжительность цикла сжатия –  $t = 20$  мин.

Учитывая, что сера вызывает сульфидное растрескивание металла, эксплуатируемого в агрессивных средах, нами проводились испытания образцов на сульфидное растрескивание (показатель  $A_p$ ) по методике, соответствующей стандарту NACE TM-01-77 [12]. В качестве среды служил насыщенный сероводородом раствор, содержащий 5 % NaCl и 0,5 % уксусной кислоты. При этом содержание  $H_2S$  составляло 50 г/л. Начальное значение pH = 3,8, конечное – 4,1. Температура среды +22 °С, базовое время испытаний – 680 ч. Все образцы испытывали при напряжении, равном 0,8 предела текучести металла (сталь ВСт3сп), который определяли при разрыве трех образцов на воздухе. На образцах посередине вырезали кольцевую проточку.

Испытания проводили методом непрерывной деформации до разрушения (с малой скоростью  $= 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ ) в коррозионной среде [11].

Очевидно, что назрела острая необходимость в поиске новых методов эффективного анализа трещиностойкости. Решение этой задачи связано

с новыми информационными технологиями, важное место среди которых занимают искусственные нейронные сети (ИНС) [13].

Из работ [13–15] известно, что метод нейросетевого моделирования применим к изучению коррозионно-механических процессов, которые в большинстве своем представляют как многофакторные системы, характеризующиеся совокупностью коррозионно-механических параметров (критерии трещиностойкости, работа зарождения и распространения трещины, прочностные и вязкопластические показатели), нелинейно изменяющихся с изменением характеристик среды и материалов (концентрация, температура, pH, химический состав стали и др.).

Авторами 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 ВСт3сп, как наиболее распространенной в строительстве РВС. Нейронные системы должны предсказывать характеристические критерии трещиностойкости стали, контактирующей с активными средами и находящейся под действием циклических нагрузок.

В данной работе использовали ИНС с тремя выходами, т.е. ее 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. Согласно [14, 15], как правило, одного скрытого слоя достаточно для решения подобных задач.

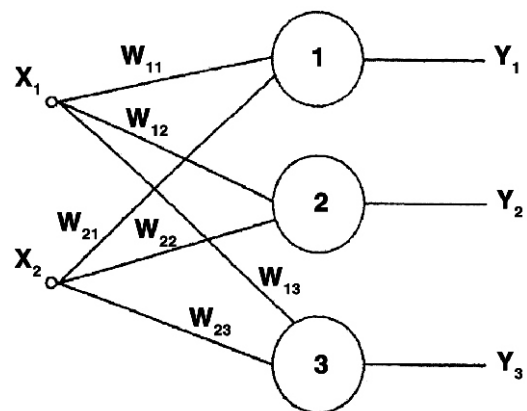


Рис. 1. Структурная схема нейросети:

$X_1$  и  $X_2$  – входные сигналы (значения концентраций цинка и серы в металле);  $Y_1, Y_2, Y_3$  – выходные сигналы (показатели трещиностойкости  $K_{IC}$ ,  $KCV$ ,  $A_p$ )



Для выбора оптимального числа нейронов в скрытом слое ИНС использовали, в соответствии с рекомендациями [15], нейрогенетический алгоритм, который обеспечивает быстрый поиск оптимальной структуры [14]. 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 тестов (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 к ее изменению 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 построены обобщенные зависимости критериев трещиностойкости стали ВСтЗсп от количества растворенных в ней церия и серы 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 параметров трещиностойкости ( $K_{1C}$ ,  $KCV$ ,  $A_p$ ) опытной резервуарной стали ВСтЗсп, содержащей переменную концентрацию микродобавки церия, приведены на рис. 2. Влияние переменного содержания серы на те же параметры трещиностойкости представлены на рис. 3.

Прежде всего следует отметить, что данные, приведенные на рис. 2 и рис. 3, получены в ограниченном диапазоне условий, материалов и сроков испытаний, что не позволяет провести масштабный анализ зависимостей критериев трещи-

ностойкости от концентрации растворенных в металле ингредиентов – церия и серы. Очевидным является лишь наличие определенно симбатных (нелинейных) связей между переменными.

В то же время анализ данных на рис. 2 однозначно свидетельствует о следующем. С увеличением содержания в опытных сталях модифицирующей микродобавки церия улучшаются параметры вязкости сталей, в частности, повышаются значения критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_{1C}$  и ударной вязкости  $KCV$ , причем во всем интервале исследуемых температур (от +20 °С до –30 °С).

Эта же тенденция наблюдается и при исследовании на коррозионное сульфидное растрескивание в коррозионной среде (рис. 2, в).

Данные на рис. 2 указывают на резкое снижение параметров трещиностойкости ( $K_{1C}$ ,  $KCV$ ) с увеличением содержания в опытных сталях концентрации растворенной серы, в связи с чем требуется ограничение ее в пределах 0,020 % ... 0,025 %. Такая же тенденция характерна и для разрушения в зависимости от концентрации серы: низкое содержание серы (менее 0,025 %) благоприятно влияет на стойкость против сульфидного растрескивания.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о сложной зависимости параметров трещиностойкости от содержания в исследуемых сталях модифицирующей микродобавки церия (рис. 2) и вредной примеси – серы (рис. 3). Поэтому, в таком случае воспользуемся для анализа экспериментальных данных нейросетевым моделированием.

Известно [14], что структура и методы обучения ИНС зависят от качественного массива экспериментальных данных, подаваемых на вход ИНС, и сложности изучаемых коррозионно-механических 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 критериев трещиностойкости (в качестве примера в табл. 1 приведены результаты обучения и тестирования ИНС по критерию трещиностойкости  $K_{1C}$ ).

Среднеквадратичные ошибки обучения и тестирования составляют соответственно 0,6 % – 2,7 % и 2,5 % – 5,2 % и свидетельствуют о хорошей обученности ИНС и их способности с дос-

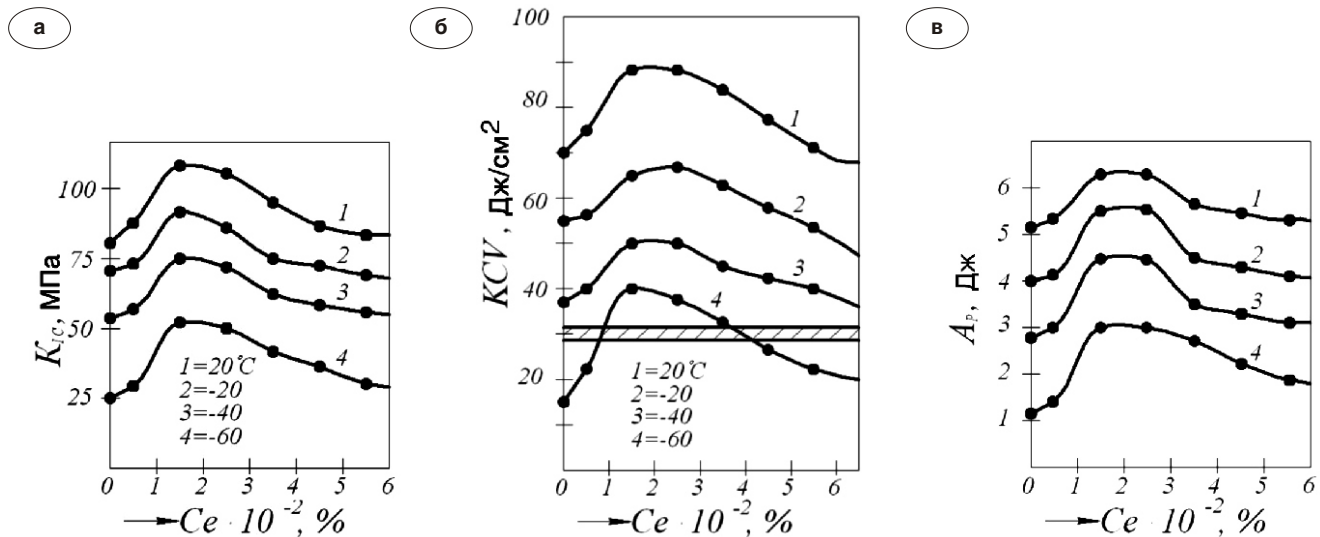


Рис. 2. Влияние модифицирующей микродобавки церия на параметры трещиностойкости опытных резервуарных сталей при испытании в широком интервале температур:

а –  $K_{IC} = f(Ce)$ ; б –  $KCV = f(Ce)$ ; в –  $A_p = f(Ce)$ .

Цифровое обозначение: 1 – (+)20 °C; 2 – (-)10 °C; 3 – (-)20 °C; 4 – (-)30 °C

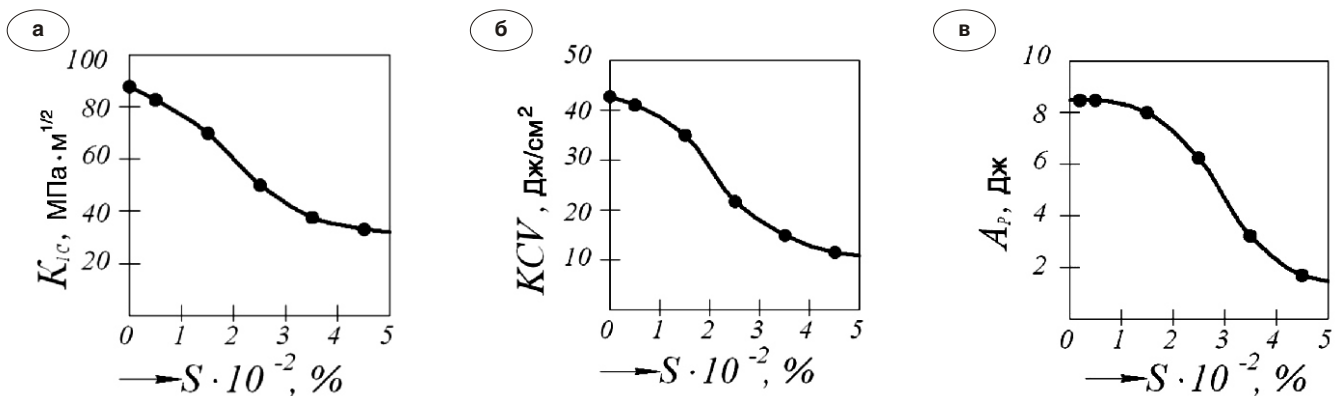


Рис. 3. Влияние концентрации растворенной в металле серы на параметры трещиностойкости опытных резервуарных сталей:

а –  $K_{IC} = f(S)$ ; б –  $KCV = f(S)$ ; в –  $A_p = f(S)$ . Температура испытания: -30 °C

Таблица 1

Оптимальные параметры ИНС для прогнозирования критерия трещиностойкости  $K_{IC}$  и ошибка ИНС при обучении и тестировании

Критерий трещиностойкости на выходе сети	Количество нейронов в скрытом слое сети	Ошибка обучения сети	Ошибка тестирования сети	Алгоритм обучения	Число циклов обучения
$K_{IC}$	6	0,0079	0,0456	ЛМ	340
	6	0,0057	0,0382	ССГ	295

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

таточно малой ошибкой предсказывать значения показателя трещиностойкости.

При оценке влияния каждого из входных параметров (концентрация модифицирующей добавки церия и примеси серы) на качество критерием значимости фактора служила степень ухудшения работы ИНС в случае его отсутствия [14]. Чувствительность каждой переменной в отдельности

обучающего и тестового подмножества оценивали по трем параметрам – «Ранг», «Ошибка» и «Отношение». Значения этих параметров и их роль при проведении обучающих и тестовых операций подробно описаны в работах [14, 15].

Из данных таблицы 2 видно, что сильнее всего на показатель  $K_{IC}$  влияет концентрация серы в металле и значительно слабее концентрация церия.

Таким образом, наиболее значимым входным параметром для рассматриваемого показателя оказывается концентрация в металле серы.

Таблица 2

**Влияние концентрации церия и серы на показатель трещиностойкости  $K_{1C}$  резервуарной стали опытного производства**

Параметр	Входные переменные			
	Обучение		Тестирование	
	концентрация		концентрация	
	Ce	S	Ce	S
Ранг	2	1	2	1
Ошибка	0,084	0,189	0,067	0,128
Отклонение	10,315	21,733	2,391	4,837

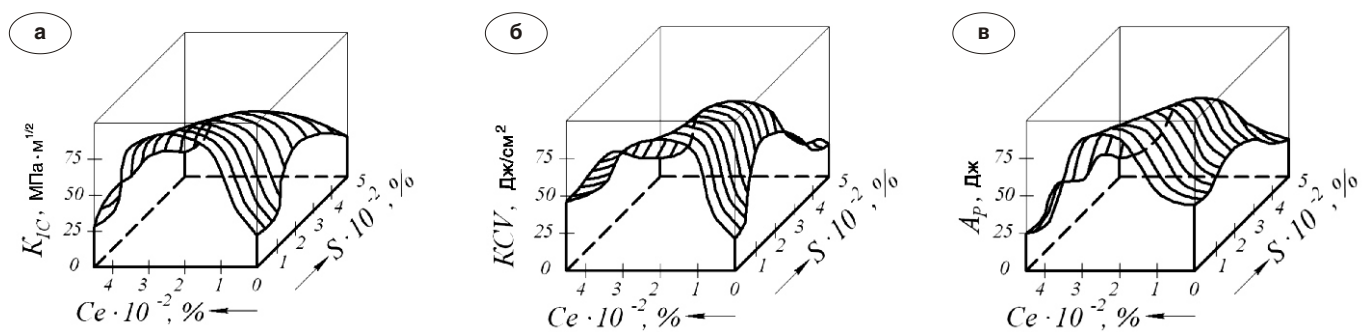
Обученные ИНС использовали для прогнозирования показателей коррозионно-механической трещиностойкости как внутри области экспериментально апробированных параметров, так и за ее пределами. Как видно из рис. 4, показатели трещиностойкости ( $K_{1C}$ ,  $KCV$ ,  $A_p$ ) сложным образом зависят от концентрации церия и серы в испытываемых (экспериментальных) сталях резервуарного назначения, но тем не менее можно проследить некоторые общие закономерности.

Так, при совместном увеличении церия (0,025 %) и серы (0,020 % ... 0,025 %) резко снижается коррозионно-механическая трещиностойкость резервуарной стали. Такая же тенденция наблюдается и в случае совместного одновременного увеличения в металле серы (свыше 0,025 %) и уменьшения церия (менее 0,015 % ... 0,020 %). Наиболее высокие и стабильные значения параметров трещиностойкости достигаются при содержании церия в пределах 0,020 % ... 0,025 % и серы не более 0,020 %. Эти данные хорошо согласуются с известными результатами исследований [8–10].

Обученные ИНС позволили проанализировать как соотносятся между собой концентрации церия и серы с позиции комплексного влияния на коррозионно-механическую трещиностойкость, в т.ч. лежащих вне пределов области экспериментов.

Анализ полученных результатов с помощью нейросетей позволил получить обобщенную диаграмму (рис. 5) предсказанных областей трещиностойкости резервуарных низкоуглеродистых сталей, экономно модифицированных микродобавкой церия и контактирующих с коррозионно-активными средами при минусовых температурах воздуха (до  $-30^\circ\text{C}$ ).

Таким образом, ИНС позволили однозначно определить области коррозионно-механической трещиностойкости стали и показать, в каких случаях она склонна к образованию микротрещин при контакте с агрессивной средой и как на этот процесс совместно влияют церий и сера. Полученные данные позволяют сделать важный практический вывод: при эксплуатации низкоуглеродистой конструкционной стали в нейтральных средах при минусовых температурах ее склонность к трещинообразованию будет значительной при повышенном содержании серы в металле и отсутствии модифицирующих добавок. Добиться высокой трещиностойкости можно путем микролегирования стали модифицирующей добавкой церия, даже несмотря на относительно высокое содержание вредной примеси серы (0,03 % – 0,045 %). На основе зависимостей, аналогичных изображенным на рис. 5, можно, не проводя дополнительных исследований, качественно предсказывать коррозионно-механическую трещиностойкость резервуарной стали в конкретных условиях эксплуатации.



**Рис. 4. Нейросетевой анализ параметров трещиностойкости опытных низкоуглеродистых резервуарных сталей с переменным содержанием модифицирующей микродобавки церия в зависимости от содержания серы в металле:**  
 а –  $K_{1C} = f(Ce; S)$ ; б –  $KCV = f(Ce; S)$ ; в –  $A_p = f(Ce; S)$ . Температура испытания образцов  $-30^\circ\text{C}$

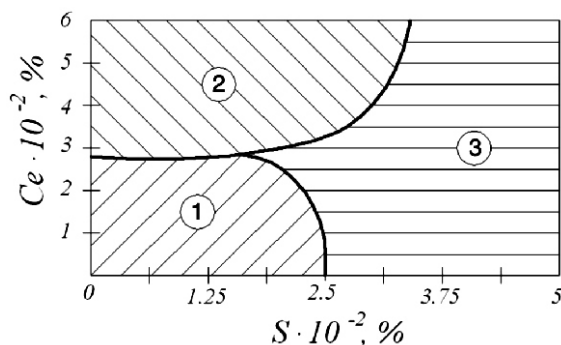


Рис. 5. Прогнозируемая нейросетью трещиностойкость резервуарных сталей, экономно модифицированных церием, с переменным содержанием серы:

1 – область высокой трещиностойкости; 2 – область средней трещиностойкости; 3 – область низкой трещиностойкости

Следует отметить, что данные на рис. 5 находятся в согласии с многочисленными известными случаями повреждений и разрушений резервуарных конструкций из низкоуглеродистых сталей, эксплуатируемых в экстремальных условиях нефтяных месторождений, а также в умеренных условиях нефтеперерабатывающих заводов Украины. Обученная ИНС позволяет расширить диапазон прогнозируемых значений факторов за пределы экспериментальных данных, в частности, предсказать значения показателей трещиностойкости сталей, содержащих такие элементы, как серу и церий в количествах, находящихся за пределами рассмотренных в данном исследовании. Естественно, ошибка прогноза, выдаваемого ИНС, будет увеличиваться по мере удаления от границ, определяющих экспериментальные данные.

## Выводы.

1. Стальной резервуар в период эксплуатации подвержен деградации, т.е. происходит его физический износ, изменяются прочностные характеристики, накапливаются разнообразные дефекты и повреждения, причем все эти процессы носят ярко выраженный случайный характер. Среди причин отказа решающую роль играют: коррозионный износ, неравномерные осадки основания, дефекты геометрии цилиндрической стенки и трещиновидные дефекты. При этом наиболее значимым фактором в процессах деградации является коррозионный износ.

2. Применение нейросетевого анализа для прогнозирования характера трещиностойкости низкоуглеродистой стали, предназначенной для изготовления нефтяных резервуаров, позволяет адекватно прогнозировать характер сопротивления зарождению и росту коррозионно-механических трещин в зависимости от содержания в резервуарных низкоуглеродистых сталях легирующих элементов и вредных примесей.

3. С использованием метода нейросетевого анализа определены области коррозионно-механической трещиностойкости резервуарной стали и показано, что высокая трещиностойкость низкоуглеродистой стали достигается введением в ее состав 0,020 % – 0,025 % церия при одновременном ограничении концентрации серы до 0,020 %.

[1] Кесельман Г.С. Экономическая эффективность предотвращения коррозии в нефтяной промышленности. – М.: Недра, 1988. – 215 с.

[2] Буренин В.А. Прогнозирование индивидуального остаточного ресурса стальных вертикальных резервуаров: Дисс. докт. техн. наук. – Уфа, 1994. – 270 с.

[3] Исима Т. Исследование причин аварий при хранении нефти в резервуарах на предприятиях фирмы «Мицубиси Сэкио» // Перевод с японского языка из журнала «Добоку Сэко». – 2005. – т.16, №9. – С. 93–94.

[4] Розенштейн И.М. Аварии и надежность стальных резервуаров. – М.: Недра. – 1985. – 253 с.

[5] Вайсман Л.Г., Головнева А.П. Проблемы коррозии и защита резервуаров на промыслах Главтюменнефтегаза // Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности. – 1982. – № 8. – С. 22–23.

[6] Веревкин С.Н., Ржавский Е.Л. Повышение надежности резервуаров, газгольдеров и их оборудования. – М.: Недра, 1980. – 248 с.

[7] Егоров Е.А., Семенов С.С. Основные этапы деградации нефтяных резервуаров в процессе эксплуатации // Вісник Придніпровської державної академії будівництва і архітектури. – Дніпропетровськ: ПДАБтаА. – 2000. – № 8. – С. 30–33.

[8] Овчинников И.Г., Кудайбергенов Н.Б., Шейн А.А. Эксплуатационная надежность и оценка состояния резервуарных конструкций. – Саратов: СГТУ, 1999. – 316 с.

[9] Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения. – М: Машиностроение. – 1981. – 272 с.

[10] РД-50-345-82. Определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении. – М.: Изд. Стандартов. – 1983. – 96 с.

[11] МСКР-01-85. Методика испытания на стойкость против сероводородного коррозионного растрескивания. – М.: Изд-во ГКНТ СССР, 1985. – 4 с.

[12] NACE Standard TM01-77(90). Standard Test Method. Laboratory Testing of Metals Resistance to Sulfide Stress Cracking in H<sub>2</sub>S Environments // NACE. – Houston. P.O. BOX 218340. 1990. – 22 p.

[13] Уоссерман Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. – М.: Мир. – 1992. – 183 с.

[14] Горбань А.Н. Обучение нейронных сетей. – М.: СП «ПараГраф». – 1991. – 156 с.

[15] Нейронные сети в Statistica Neural Network / Пер.с англ. – М.: Горячая линия. – Телеком. – 2000. – 182 с.

[16] Makarenko V.D. (2001) Effect of modifying additions on the ductility and plastic properties and the brittle strength of cold-resistant, low-alloy steel / V.D. Makarenko, V.A. Beljaev, E.N. Galichenko, N.N. Prohorov // Welding International. – 2001. No. 15(1). P. 62–70.

[17] Makarenko V.D. Effect of modifying microadditions on the corrosion resistance of welded joints in low-alloy steel / V.D. Makarenko, V.A. Beljaev, E.N. Galichenko, N.N. Prohorov // Welding International. – 2001. No. 15(2). P. 78–85.

Надійшла 27.02.2020 р.