

УДК 004.94:[620.194.22:622.691.4.053]

## Модель интеллектуального прогнозирования стресс-коррозионной поврежденности магистральных газопроводов

Р.Р. Кантюков<sup>1</sup>, И.В. Ряховских<sup>1\*</sup>, Д.А. Мишарин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, с.п. Развилковское, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

<sup>2</sup> ПАО «Сбербанк России», Российская Федерация, 620026, г. Екатеринбург, ул. Горького, д. 67

\* E-mail: I\_Ryakhovskikh@vniigaz.gazprom.ru

**Тезисы.** В статье представлены результаты разработки нейросетевой модели прогнозирования стресс-коррозионной поврежденности участков магистральных газопроводов (МГ). Показан выбор оптимальных архитектуры и алгоритма обучения нейронной сети с точки зрения минимизации времени и повышения точности вычислений. Отмечено, что для успешного решения задачи нейросетевого моделирования стресс-коррозионной поврежденности участков МГ важным этапом является качественная подготовка набора исходных обучающих данных. Определение факторов, в наибольшей степени оказывающих влияние на результат нейросетевого моделирования, позволяет повысить эффективность работы интеллектуального алгоритма, а также минимизировать время, необходимое для решения задачи и обработки данных. Мониторинг с использованием разработанной модели факторов коррозионного растрескивания под напряжением, соответствующий прогноз динамики поврежденности труб МГ стресс-коррозией, а также своевременные профилактические мероприятия по предотвращению развития стресс-коррозии позволят существенно снизить затраты на техническое обслуживание и ремонт МГ.

**Ключевые слова:** прогнозирование, стресс-коррозионные повреждения, коррозионное растрескивание под напряжением, магистральный газопровод, алгоритм, нейронные сети.

Российская Федерация эксплуатирует крупнейшую в мире систему магистральных газопроводов (МГ), большинство из которых построены в 1970–1980-е гг. Специфика технических решений по антикоррозионной защите подземных участков трубопроводов, принятых на этапе строительства газотранспортной системы [1], способствовала интенсивному развитию подпленочной коррозии и стресс-коррозии МГ.

Во всем мире коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) является одним из наиболее распространенных и опасных видов повреждений подземных участков МГ большого диаметра, изолированных ленточными покрытиями трассового нанесения. В настоящее время рядом научно-исследовательских коллективов предлагаются различные технологии непрямого контроля МГ, результаты которого возможно применять при прогнозировании КРН [2, 3]. К таким технологиям относятся системы геотехнического и коррозионного мониторинга, контроля напряженно-деформированного состояния, поиска сквозных повреждений и нарушения сплошности защитного покрытия МГ. Однако эффективность результатов прогнозирования КРН МГ с применением вышеуказанных технологий не всегда обеспечивает высокую эффективность по нескольким причинам.

Во-первых, методики статистического прогнозирования поврежденности МГ КРН-дефектами базируются на инструментах балльно-факторного анализа данных, что не позволяет оценить совокупное влияние различных сочетаний основополагающих факторов данного процесса. Показано [4, 5], что число анализируемых факторов при прогнозировании КРН может достигать 24. Кроме того, балльно-факторные, или экспертные, методы факторного анализа весьма субъективны в условиях неполноты исходных данных или использования информации, полученной с применением различных приборов, трактовка показаний которых зависит от опыта и эрудиции конкретного эксперта-диагноста.

Во-вторых, отсутствуют соответствующие инструменты для использования расчетных моделей процесса КРН, позволяющие описывать стадийную кинетику разрушения стальных труб в условиях эксплуатации МГ [6]. Вследствие многостадийности

и многофакторности данного явления [7, 8] наблюдается существенная избирательность (неравномерность) процесса стресс-коррозии МГ, что усложняет решение задач предиктивного прогнозирования как в отношении поврежденности отдельных труб дефектами, так и в отношении кинетики процесса на различных участках газопроводов [9, 10]. Поэтому учет результатов мониторинга факторов, определяющих процесс КРН, и соответствующий прогноз изменения динамики поврежденности труб стресс-коррозией требуют применения современных математических инструментов.

По мере развития компьютерных технологий все чаще для решения сложных многофакторных задач используются технологии искусственного интеллекта и машинного обучения. В конце прошлого века отмечалось [11], что в каждой предметной области при ближайшем рассмотрении можно найти задачи в постановке, предполагающей их решение на основе искусственных нейронных сетей – одного из методов машинного обучения.

Не стала исключением и отрасль трубопроводного транспорта. В последние годы в России и за рубежом наблюдается тенденция использования статистических методов анализа данных [12–15], накопленных в процессе эксплуатации газопроводов, построения на их основе комплексных моделей исследуемого объекта для выявления закономерностей эволюции протекающих деградиционных процессов и прогнозирования состояния МГ в условиях неполноты данных технического диагностирования.

В статье подробно рассмотрены результаты, достигнутые ООО «Газпром ВНИИГАЗ» начиная с 2010 г. в области компьютерного моделирования процессов на основе анализа больших массивов данных с применением геоинформационных моделей, статистического аппарата и методов машинного обучения [16], а именно: представлена нейросетевая модель прогнозирования поврежденности МГ дефектами КРН, в частности, описаны процессы формирования пространства факторов-признаков, нормализации исходных данных, подбора оптимальной архитектуры, выбора нелинейной функции активации нейронов и целевой функции ошибки, определения наиболее эффективного алгоритма обучения и настройки весовых коэффициентов синоптических связей нейронов сети, а также

ее апробации и оценки ее точности на действующем объекте МГ.

### Методика прогнозирования

На первом этапе сформировано пространство факторов-признаков, характеризующих стресс-коррозионную поврежденность МГ, на основании данных, полученных для участков МГ, расположенных на территории Ханты-Мансийского автономного округа [17]. Источниками данных послужили результаты специализированных обследований физико-химических характеристик грунтов вдоль участка МГ, а также технической диагностики труб на наличие КРН-дефектов в ходе предремонтных обследований, коррозионного мониторинга, геотехнического диагностирования [17, 18].

Для исключения факторов-признаков, имеющих наименьшие корреляционные связи со стресс-коррозионной характеристикой анализируемого участка МГ, проведен факторный анализ, удалены выбросы, произведены нормализация и шкалирование переменных. Определено, что в наибольшей степени корреляцию с наличием на участке МГ стресс-коррозионных повреждений демонстрируют следующие факторы: расстояние от выхода компрессорной станции, конструкция труб, агрессивность грунта<sup>1</sup> в ракурсе развития КРН, уровень pH грунтовой среды, сумма концентраций карбонат- и бикарбонат-ионов, сумма концентраций сероводорода, бисульфид- и сульфид-ионов, скорость внедрения водорода в сталь, содержание кислорода в грунте, скорость анодного растворения стали в грунте, геотехнические условия (наличие подземных и наземных водотоков, существование участков МГ в непроектном положении, уровень грунтовых вод).

Исходное множество всех нормализованных данных «Факторы КРН» разбивали в пропорции 7:3 на два подмножества – обучающее и проверочное. В свою очередь, элементы первого подмножества делились пополам на две группы – имеющие стресс-коррозионные повреждения и не имеющие таковых; второе подмножество использовалось для оценки точности работы нейросетевой модели (рис. 1). Полученные подмножества – это наборы

<sup>1</sup> См. Р Газпром 2-2.3-761-2013. Методика определения характеристик грунтов, провоцирующих коррозионное растрескивание под напряжением металла на магистральных газопроводах.

исходных данных, необходимые для формирования рабочей модели интеллектуального прогнозирования стресс-коррозионной поврежденности МГ.

После подготовки наборов исходных данных определяли оптимальную архитектуру строения нейронной сети. С учетом сложности решаемой задачи и необходимости минимизации времени вычисления результата был выбран многослойный персептрон [18, 19], входной слой которого состоит из 12 нейронов, скрытый – из 15 нейронов, выходной – из одного нейрона (рис. 2). Количество нейронов входного слоя соответствует количеству факторов КРН (см. рис. 1 слева). Для скрытого слоя число нейронов подбиралось экспериментально в зависимости от точности прогноза нейронной сети. Нейрон в выходном слое отвечает за выдачу результатов прогноза о наличии или отсутствии КРН-дефектов на участке МГ.

Нейроны соседних слоев персептрона соединяются между собой синоптическими связями, имеющими определенные весовые коэффициенты. Весовые связи принято обозначать через  $w_{ij}^l$ , где  $i$  и  $j$  – номера узлов в слоях  $l+1$  и  $l$  соответственно.

Входной слой предназначен для подачи на него в неизменном виде числовых значений из обучающего и проверочного подмножеств, представленных на рис. 1, к которым добавляется переменная смещения. На скрытом и выходном слоях происходит преобразование входных данных согласно алгоритму работы персептрона.

Скрытый и выходной слой являются обучаемыми, именно от них в большей степени зависит результат прогноза; каждый нейрон данных слоев включает в себя взвешенный сумматор  $\Sigma$  и нелинейный элемент, содержащий функцию  $F$  активации нейрона (рис. 3).

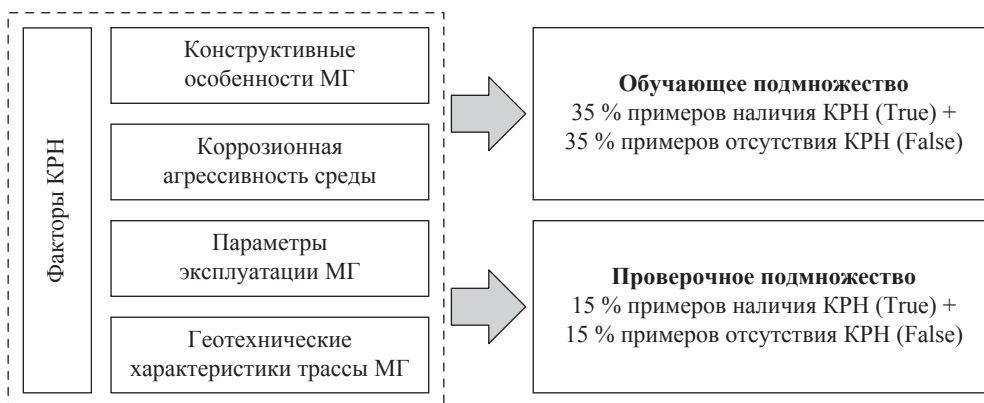


Рис. 1. Схема формирования наборов исходных данных

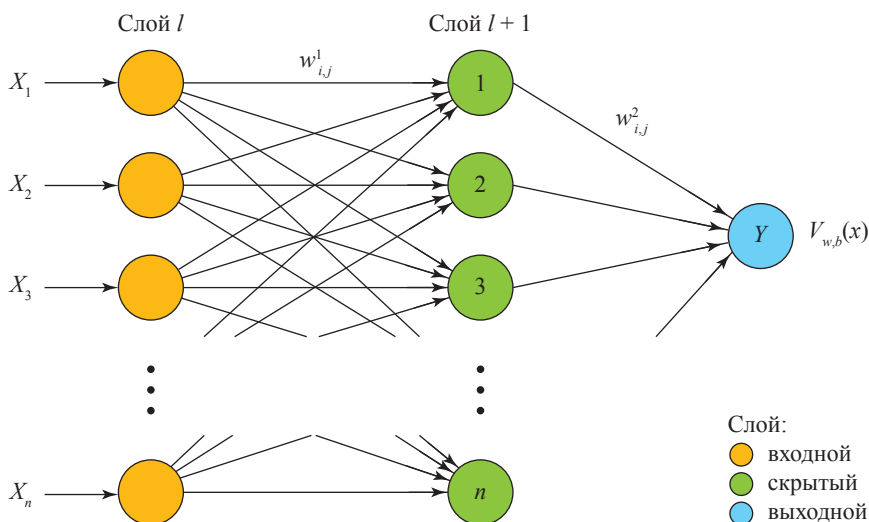


Рис. 2. Архитектура прогнозной нейросетевой модели (многослойный персептрон):  $V_{w,b}(x)$  – выходной сигнал нейросети при заданных весовых коэффициентах ( $w$ ) и смещениях ( $b$ )

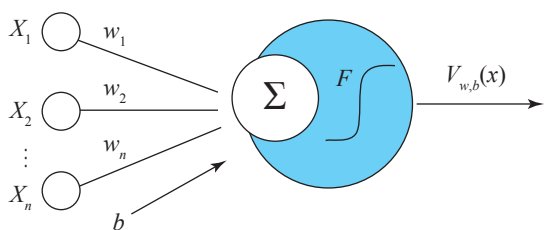


Рис. 3. Структурная схема искусственного нейрона

Результат работы искусственного нейрона (см. рис. 1, 3) описывается уравнением

$$V_{w,b}(v) = F\left(\sum_i (w_i x_i) + b\right), \quad (1)$$

где  $\sum_i (w_i x_i)$  – взвешенная сумма входных сигналов нейрона;  $x_i$  – входные данные по участку МГ, совокупность которых формирует вектор  $x$ ; совокупность весовых коэффициентов  $w_i$  формирует вектор  $w$ .

В качестве нелинейной функции активации нейронов выбрана сигмовидная функция Ферми

$$F(x) = \frac{1}{1 + e^{-2\alpha \sum_i (w_i x_i)}}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – произвольная константа.

Выбранная функция является гладкой и дифференцируемой на всей области определения. Непрерывность 1-й производной, в частности, позволяет обучать нейронную сеть градиентным методом, т.е. путем последовательного изменения весовых коэффициентов таким образом, чтобы минимизировать

целевую функцию  $E(w)$  ошибки сети до тех пор, пока ее значение не станет равным некоторому заданному числу  $\varepsilon$  либо меньше него (рис. 4). Целевую функцию (среднеквадратичную ошибку отклонения) определяли через половину суммы среднеквадратичных разностей требуемых и вычисленных состояний для всех нейронов:

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_i (y_i - d_i)^2, \quad (3)$$

где  $y_i$  – вычисленное состояние выхода  $i$  нейрона;  $d_i$  – требуемое (идеальное) состояние выхода  $i$  нейрона.

На следующем шаге производится структурная оптимизация нейронной сети для увеличения скорости вычисления результата без ущерба качеству ее работы.

Обучение разработанной нейросетевой модели производилось методом обратного распространения ошибки по алгоритму адаптивного стохастического градиентного спуска (модификация Adam) [20]. Данный алгоритм подходит для решения задач с зашумленными или разреженными данными. Алгоритм обладает инерционностью и в отличие от классического метода градиентного спуска позволяет быстрее и точнее определять оптимум функции. В соответствии с ним на первом шаге весам связей нейронов сети присваиваются случайные численные значения. Затем вычисляется градиент функции потерь:

$$g_t = \nabla f(w_{t-1}), \quad (4)$$

где  $t$  – номер шага обучения.

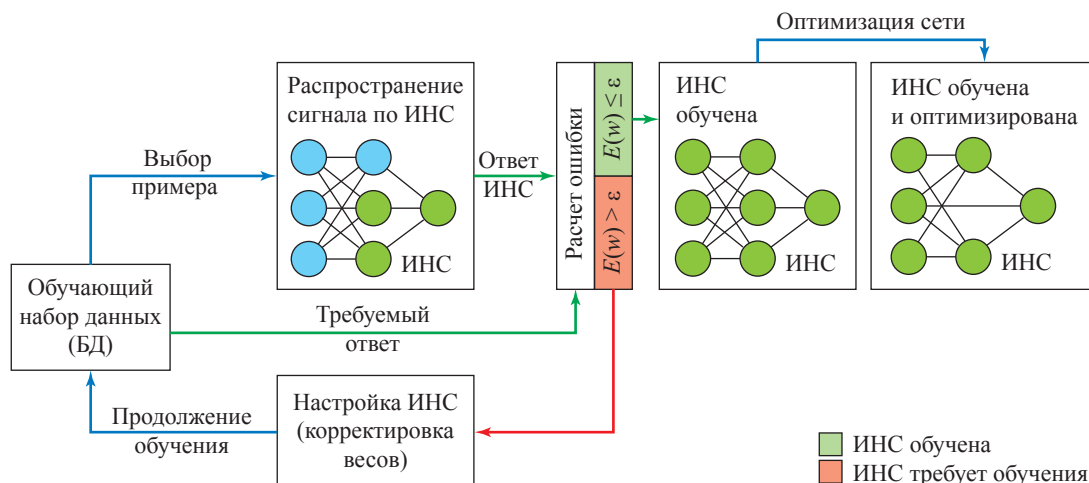


Рис. 4. Процесс обучения ИНС: БД – база данных

На следующем шаге производится преобразование градиента по следующим формулам:

$$m_t = \alpha m_{t-1} + (1 - \alpha) g_t, \quad (5)$$

$$v_t = \beta v_{t-1} + (1 - \beta) g_t^2, \quad (6)$$

$$\bar{m}_t = \frac{m_t}{1 - \alpha}, \quad (7)$$

$$\bar{v}_t = \frac{v_t}{1 - \beta}, \quad (8)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – гиперпараметры;  $m_t$ ,  $v_t$  – параметры градиента.

На конечном этапе вычисляются скорректированные весовые коэффициенты по формуле

$$w_t = w_{t-1} - \frac{\eta}{\sqrt{\bar{v}_t} + \xi} \bar{m}_t, \quad (9)$$

где  $\xi$  – сглаживающий параметр;  $\eta$  – коэффициент скорости обучения.

### Результаты прогнозирования и их обсуждение

Обучение разработанной нейронной сети проводилось на выборке, состоящей из 358 векторов значений, где каждый вектор соответствовал дефектному элементу МГ, проверочная выборка содержала 58 значений.  $E(w) = 0,0321$ . Время обучения нейронной сети составило 89 мин. График изменения  $E(w)$  в зависимости от шага обучения представлен на рис. 5.

Точность работы нейросетевой модели определяли на проверочной выборке, включавшей 58 труб, из которых 29 были дефектными

и 29 – бездефектными. Сравнение результатов прогноза нейросетевой модели с заранее известными данными о наличии на трубах КРН-дефектов показало, что реализованная нейросетевая модель позволяет выявлять участки МГ, имеющие стресс-коррозионные повреждения, с точностью не ниже 92 %. Полученный результат дает право полагать, что применение разработанной модели при прогнозировании поврежденности МГ КРН обеспечит аналогичный результат.

Разработанная ООО «Газпром ВНИИГАЗ» нейросетевая модель прогнозирования стресс-коррозионной поврежденности участков МГ и алгоритм ее обучения реализованы в виде компьютерного приложения (рис. 6) на объектно-ориентированном языке высокого уровня. Приложение позволяет настраивать необходимым образом архитектуру нейронной сети, выбирать количество слоев и нейронов, задавать параметры оптимизации и изменять количество входных параметров решаемой задачи, а также имеет удобный интерфейс управления.

\*\*\*

Мониторинг факторов, определяющих процесс КРН, соответствующий прогноз динамики поврежденности труб МГ стресс-коррозией с использованием разработанной нейросетевой модели, а также своевременная профилактика развития стресс-коррозии позволят существенно снизить затраты на техническое обслуживание и ремонт МГ за счет повышения достоверности прогноза их поврежденности без проведения дополнительных обследований в шурфах.

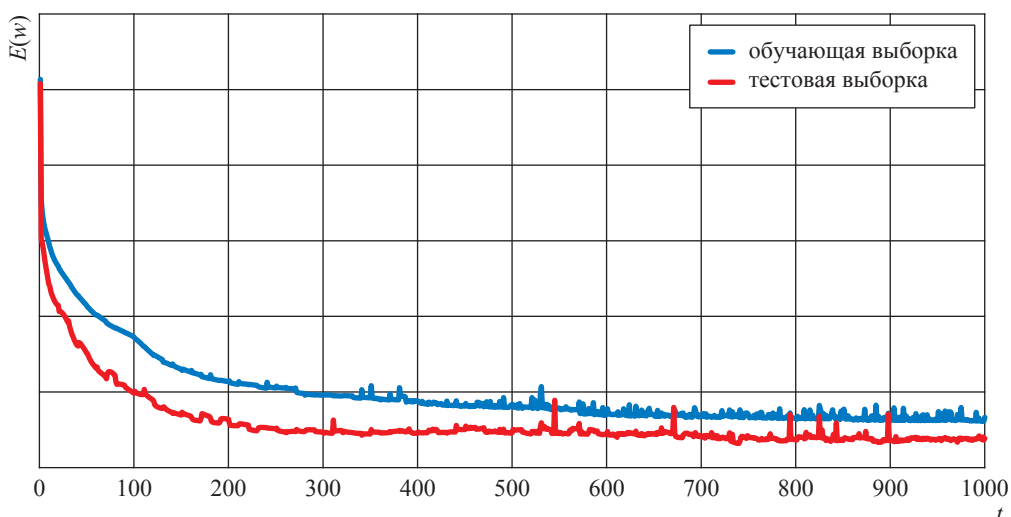


Рис. 5. График изменения среднеквадратичной ошибки работы нейронной сети

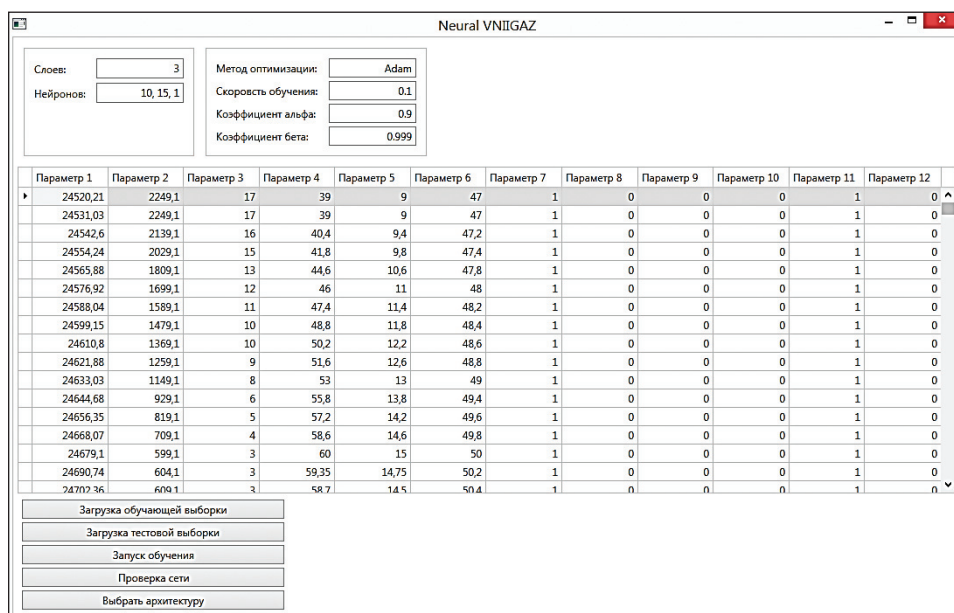


Рис. 6. Главное окно разработанного приложения

В перспективе возможны дополнение разработанной нейросетевой модели и реализованных алгоритмов интеллектуальными методами прогнозирования кинетики развития стресс-коррозионных повреждений и внедрение их в действующую Систему управления техническим состоянием и целостностью

газотранспортной системы ПАО «Газпром» для линейной части МГ и технологических трубопроводов компрессорных станций. В дальнейшем целесообразна разработка аналогичной нейросетевой модели для прогнозирования подплечной коррозии на участках МГ ПАО «Газпром».

## Список литературы

1. Ряховских И.В. Совершенствование технологии ремонта протяженных участков магистральных газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением / И.В. Ряховских, А.В. Мельникова, Д.А. Мишарин и др. // Вести газовой науки: Повышение надежности магистральных газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2016. – № 3 (27). – С. 79–86.
2. Нефёдов С.В. Прогнозирование стресс-коррозионной поврежденности труб на участках магистральных газопроводов с применением вероятностно-статистических методов и технологий машинного обучения как элемент СУТСП ГТС ПАО «Газпром» / С.В. Нефёдов, И.В. Ряховских, Р.И. Богданов и др. // Материалы 8-й Международной конференции «Обслуживание и ремонт основных фондов ПАО «Газпром»» – 2016. – М.: МАКС Пресс, 2017. – С. 163–186.
3. Коваленко С.В. Принцип прогнозирования возможного типа (природы) аварии на магистральном газопроводе, основанный на распознавании образов / С.В. Коваленко, И.В. Ряховских, А.Б. Докутович и др. // Газовая промышленность. – 2018. – № 6. – С. 25–29.
4. Куимов С.Н. Информационно-аналитическое сопровождение процессов управления техническим состоянием газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением / С.Н. Куимов, С.В. Баусов, А.И. Истомин и др. // Вести газовой науки: Повышение надежности магистральных газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2016. – № 3 (27). – С. 131–139.
5. Нефёдов С.В. Планирование диагностических и ремонтных работ на участках линейной части магистральных газопроводов ООО «Газпром трансгаз Югорск», подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением / С.В. Нефёдов, И.В. Ряховских, Р.И. Богданов, и др. // Вести газовой науки: Повышение надежности магистральных газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2016. – № 3 (27). – С. 88–96.

6. Ryakhovskikh I.V. Regularities of pipelines stress corrosion cracking / I.V. Ryakhovskikh, R.I. Bogdanov, A.B. Arabey // Proc. of the 14<sup>th</sup> Pipeline Technology Conference 2019, March 19–21, Berlin, Germany. – 2019. – С. 13. – <https://www.pipeline-conference.com/abstracts/regularities-pipelines-stress-corrosion-cracking>
7. Ряховских И.В. Закономерности коррозионного растрескивания под напряжением трубных сталей / И.В. Ряховских, Р.И. Богданов, И.Г. Родионова и др. // Сб. тр. IX Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» (ПРОСТ-2018). – М.: Студио-Принт, 2018. – С. 191.
8. Малкин А.И. Процессы зарождения и роста коррозионных трещин на стали магистральных трубопроводов. Ч. II: Кинетические закономерности и влияние условий эксплуатации на КРН трубных сталей в водных средах / А.И. Малкин, А.И. Маршаков, В.Э. Игначенко и др. // Коррозия: материалы, защита. – 2010. – № 2. – С. 1–14.
9. Stress corrosion cracking: Recommended practices. – 2-е изд. – Calgary, Alberta, Canada: Canadian Energy Pipeline Association (CEPA), 2007.
10. Cheng Y.F. Stress corrosion cracking of pipelines / Y.F. Cheng. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
11. Ежов А.А. Нейрокомпьютинг и его применение в экономике и бизнесе / А.А. Ежов, С.А. Шумский. – М.: МИФИ, 1998. – 224 с.
12. Кантюков Р.Р. Нейросетевые методы оценки воздействия систем газоснабжения на экологическое состояние окружающей среды / Р.Р. Кантюков, О.Б. Бутусов // IX Международная научно-практическая конференция «Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности» (ЛЭРЭП-9-2015): сб. науч. тр. – 2015. – С. 344–348.
13. Chen W. Modeling and prediction of stress corrosion cracking of pipeline steels / W. Chen // Trends in oil and gas corrosion research and technologies. Production and transmission / A.M. El-Sherik (ed.). – 1-е изд. – Sawston, Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2017. – Гл. 30. – С. 707–748.
14. Zhao J. Steels exposed to near-neutral pH environments: dissolution crack growth and occurrence of crack dormancy in stage I / J. Zhao, W. Chen, M. Yu, et al. // Metallurgical and Materials Transactions A. – April 2017. – Т. 48. – № 4. – С. 1629–1640.
15. Ginten M. An integrated approach to the integrity management of stress corrosion cracking in pipelines: a case study / M. Ginten, T. Penney, I. Richardson et al. // Proc. of Rio Pipeline Conference & Exposition, September 24–26, 2013. – 2014.
16. Есиев Т.С. Использование статистических методов и ГИС-технологий для оценки стресс-коррозионного состояния объектов МГ / Т.С. Есиев, И.В. Ряховских, С.С. Машуров и др. // Газовая промышленность. – 2010. – № 7. – С. 53–56.
17. Мирзоев А.М. Нейросетевая модель стресс-коррозионной поврежденности участков линейной части магистральных газопроводов ООО «Газпром трансгаз Югорск» / Абдугаффор М. Мирзоев, М.С. Иващенко, А.И. Маршаков // Вести газовой науки: Повышение надежности магистральных газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2016. – № 3 (27). – С. 108–112.
18. Rosenblat F. Principles of neurodynamics: Perceptrons and the theory of brain mechanisms / F. Rosenblat. – Washington D.C.: Spartan books, 1968.
19. Haykin S. Neural networks. A comprehensive foundation / S. Haykin. – 2-е изд. – Hamilton, Ontario, Canada: Prentice Hall – McMaster University, 2006.
20. Kingma D.P. Adam: a method for stochastic optimization / Diederik P. Kingma, Jimmy Ba // 3<sup>rd</sup> International conference for learning representations, San Diego, 2015. – 2015. – С. 1–15.

## Simulator for smart prediction of stress-corroded gas mains

R.R. Kantuykov<sup>1</sup>, I.V. Ryakhovskikh<sup>1\*</sup>, D.A. Misharin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Estate 15, Proyektiruemyy proezd no. 5537, Razvilka village, Leninskiy district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

<sup>2</sup> SBERBANK PJSC, Bld. 67, Gorkogo street, Yekaterinburg, 620026, Russian Federation

\* E-mail: I\_Ryakhovskikh@vniigaz.gazprom.ru

**Abstract.** This article describes creation of a neural network model for predicting stress-corrosive damages of trunk gas pipelines. Authors reveal election of an optimal network architecture and an algorithm of its teaching

as regard for minimization of time and improvement of computing accuracy. They point out that to face a challenge of connectionist modelling of pipeline stress corrosion one needs a proper initial data array to teach a model. Determination of factors mostly affecting a result of neural simulation enables to improve work of a smart algorithm, and to minimize time of data processing and handling the problem.

Monitoring of stress-corrosive factors using the new model together with a corresponding forecast of pipe damage dynamics, and timely protective measures aimed at preventing corrosive aggression will make maintenance and repair of pipeline severely cheaper.

**Keywords:** forecasting, stress-corrosive damage, stress-corrosion cracking, trunk gas pipeline, algorithm, neural networks.

## References

1. RYAKHOVSKIKH, I.V., A.V. MELNIKOVA, D.A. MISHARIN, et al. Perfecting an overhaul procedure in respect to long sections of gas mains subject to stress corrosion cracking [Sovershenstvovaniye tekhnologii remonta protyazhennykh uchastkov magistralnykh gazoprovodov, podverzhennykh korroziionnomy rastreskivaniyu pod napryazheniyem]. *Vesti Gazovoy Nauki*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, 2016, no. 3 (27): Improving reliability of gas mains subject to stress corrosion cracking, pp. 79–86. ISSN 2306-8949. (Russ.).
2. NEFEDOV, S.V., I.V. RYAKHOVSKIKH, R.I. BOGDANOV, et al. Forecasting stress-corrosion damage of pipes within the sections of gas mains using probabilistic-statistical methods and computer-assisted technologies as an element of the Gazprom PJSC System for Technical Conditioning and Integrity Control of the gas transportation network [Prognozirovaniye stress-korroziionnoy povrezhdenosti trub na uchastkakh magistralnykh gazoprovodov s primeneniym veroyatnostno-statisticheskikh metodov i tekhnologiy mashinnogo obucheniya kak element SUTSTs GTS PAO "Gazprom"]. In: *Proc. of the 8<sup>th</sup> International conference "Maintenance and repair of fixed assets of Gazprom PJSC" – 2016*. Moscow: MAKS Press, 2017, pp. 163–186. (Russ.).
3. KOVALENKO, S.V., I.V. RYAKHOVSKIKH, A.B. DOKUTOVICH, et al. Principle of predicting a possible type (nature) of an accident at a trunk gas pipeline based on recognition of images [Printsip prognozirovaniya vozmozhnogo tipa (prirody) avarii na magistralnom gazoprovode, osnovanny na raspoznavanii obrazov]. *Gazovaya Promyshlennost*. 2018, no. 6, pp. 25–29. ISSN 0016-5581. (Russ.).
4. KUIIMOV, S.N., S.V. BAUSOV, A.I. ISTOMIN, et al. Informational and analytical provision for technical conditioning of gas pipelines subject to stress-corrosion cracking [Informatsionno-analiticheskoye soprovozhdeniye protsessov upravleniya tekhnicheskim sostoyaniym gazoprovodov, podverzhennykh korroziionnomy rastreskivaniyu pod napryazheniyem]. *Vesti Gazovoy Nauki*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, 2016, no. 3 (27): Improving reliability of gas mains subject to stress corrosion cracking, pp. 131–139. ISSN 2306-8949. (Russ.).
5. NEFEDOV, S.V., I.V. RYAKHOVSKIKH, R.I. BOGDANOV, et al. Planning of diagnostics and repairs at the sections of Gazprom Transgaz Yugorsk gas mains subject to stress corrosion [Planirovaniye diagnosticheskikh i remontnykh rabot na uchastkakh lineynoy chasti magistralnykh gazoprovodov OOO "Gazprom transgaz Yugorsk", podverzhennykh korroziionnomy rastreskivaniyu pod napryazheniyem]. *Vesti Gazovoy Nauki*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, 2016, no. 3 (27): Improving reliability of gas mains subject to stress corrosion cracking, pp. 88–96. ISSN 2306-8949. (Russ.).
6. RYAKHOVSKIKH, I.V., R.I. BOGDANOV, A.B. ARABEY. Regularities of pipelines stress corrosion cracking [online]. In: *Proc. of the 14<sup>th</sup> Pipeline Technology Conference 2019, March 19–21, Berlin, Germany*, p. 13. Available from: <https://www.pipeline-conference.com/abstracts/regularities-pipelines-stress-corrosion-cracking>
7. RYAKHOVSKIKH, I.V., R.I. BOGDANOV, I.G. RODIONOVA, et al. Patterns of stress-corrosion cracking of pipe steels [Zakonomernosti korroziionnogo rastreskivaniya pod napryazheniyem trubnykh staley]. In: *Collected papers of the IX Eurasian scientific & research conference "Strength of heterogeneous structures"* [Prochnost neodnorodnykh struktur (PROST-2018)]. Moscow: Studio-Print, 2018, p. 191. (Russ.).
8. MALKIN, A.I., A.I. MARSHAKOV, V.E. IGNATENKO, et al. Processes of crack initiation and propagation on the steels of main pipelines [Protssesy zarozhdeniya i rosta korroziionnykh treshchin na staly magistralnykh truboprovodov]. Pt. II: The kinetics of crack growth and environmental effects on SCC of pipeline steels in aqueous media [Kineticheskiye zakonomernosti i vliyaniye usloviy ekspluatatsii na KRN trubnykh staley v vodnykh sredakh]. *Korroziya: materialy, zashchita*. 2010, no. 2, pp. 1–13. ISSN 1813-7016. (Russ.).
9. CANADIAN ENERGY PIPELINE ASSOCIATION. *Stress corrosion cracking: Recommended practices*. 2<sup>nd</sup> ed. Calgary, Alberta, Canada: CEPA, 2007.
10. CHENG, Y.F. *Stress corrosion cracking of pipelines*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
11. YEZHOV, A.A., S.A. SHUMSKIY. *Neurocomputing and its applications in economics and business* [Neyrokomp'yuting i yego primeneniye v ekonomike i biznese]. Moscow: MEFi, 1998. (Russ.).
12. KANTYUKOV, R.R., O.B. BUTUSOV. Neural-network methods for assessment of gas supply systems impact to ecological state of environment [Neyrosetevyye metody otsenki vozdeystviya sistem gazosnabzheniya na ekologicheskoye sostoyaniye okruzhayushchey sredy]. In: *Collected papers of the IX International*



- scientific-practical conference «Logistics and Economics of resource saving and energy saving in industry» (MNPК «LERAP-9-2015»)*. 2015, pp. 344–348. (Russ.).
13. CHEN, W. Modeling and prediction of stress corrosion cracking of pipeline steels. In: EL-SHERIK, A.M. (ed.). *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies. Production and Transmission*. 1<sup>st</sup> ed. Sawston, Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2017, ch.30, pp. 707–748.
  14. ZHAO, J., W. CHEN, M. YU, et al. Steels exposed to near-neutral pH environments: dissolution crack growth and occurrence of crack dormancy in stage I. *Metallurgical and Materials Transactions A*. April 2017, vol. 48, is. 4, pp. 1629–1640. ISSN 1073-5623.
  15. GINTEN, M., T. PENNEY, I. RICHARDSON, et al. An integrated approach to the integrity management of stress corrosion cracking in pipelines: a case study. In: *Proc. of Rio Pipeline Conference & Exposition, September 24–26, 2013*.
  16. YESIYEV, T.S., I.V. RYAKHOVSKIKH, S.S. MASHUROV, et al. Application of statistical methods and GIS-technologies for assessment of stress-corrosion status of the gas mains facilities [Ispolzovaniye statisticheskikh metodov i GIS-tekhnologiy dlya otsenki stress-korroziionnogo sostoyaniya ob'yektov MG]. *Gazovaya Promyshlennost*. 2010, no. 7, pp. 53–56. ISSN 0016-5581. (Russ.).
  17. MIRZOYEV, Abdugaffor M., M.S. IVASHCHENKO, A.I. MARSHAKOV. Connectionist pattern for stresscorrosion damage of sectors within the linear part of Gazprom Transgaz Yugorsk LLC gas mains [Neyrosetevaya model stress-korroziionnoy povrezhdennosti uchastkov lineynoy chasti magistralnykh gazoprovodov OOO “Gazprom transgaz Yugorsk”]. *Vesti Gazovoy Nauki*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, 2016, no. 3 (27): Improving reliability of gas mains subject to stress corrosion cracking, pp. 108–112. ISSN 2306-8949. (Russ.).
  18. ROSENBLAT, F. *Principles of neurodynamics: Perseptrons and the theory of brain mechanisms*. Washington D.C.: Spartan books, 1968.
  19. HAYKIN, S. *Neural networks. A comprehensive foundation*. 2<sup>nd</sup> ed. Hamilton, Ontario, Canada: Prentice Hall – McMaster University, 2006.
  20. KINGMA, D.P., J. BA. Adam: a method for stochastic optimization. In: *3<sup>rd</sup> International conference for learning representations*, San Diego, 2015, pp. 1–15.