

Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 6. С. 219-227. ISSN 2073-0128 (print)

Petroleum Engineering. 2023. Vol. 21. No. 6. P. 219-227. ISSN 2073-0128 (print)

Научная статья

УДК 622.692.4.053: 620.193

DOI: 10.17122/ngdelo-2023-6-219-227

АНАЛИЗ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ВНУТРИТРУБНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Софья Агакишиевна Боровикова, Александр Валериевич Бриков

ООО «Сахалинская Энергия», Южно-Сахалинск, Россия

Автор, ответственный за переписку

Софья Агакишиевна Боровикова, Sofiya.Borovikova@sakhalin2.ru

Аннотация. Трубопроводная система играет важную роль в структуре предприятий, занимающихся транспортировкой значительных объемов нефти и газа на большие расстояния. Однако, стальные трубопроводы подвержены влиянию коррозионно-агрессивных факторов, что может приводить к появлению дефектов и сокращению срока службы. Статистические методы анализа в последнее время все чаще используются для поддержания структурной надежности и обеспечения безопасной эксплуатации оборудования, как в нефтяной, так и в газовой промышленности. Одним из методов статистического моделирования является анализ экстремальных значений, который может использоваться для экстраполяции данных выборочных инспекционных проверок на необследованные участки. Статья посвящена оценке возможности применения статистических методов анализа данных внутритрубного технического диагностирования (ВТД) для обеспечения целостности магистральных трубопроводов. Результаты ВТД одного из участков магистрального нефтепровода использовались для определения максимальной скорости коррозии всей длины трубопровода методом экстраполяции статистического распределения Гумбеля. Приведен алгоритм построения распределения Гумбеля. Построение графика функции автокорреляции использовалось в качестве метода определения независимости измерений. Принадлежность анализируемой выборки распределению Гумбеля была подтверждена расчетом критерия согласия Андерсона-Дарлинга. Результаты ВТД оставшихся участков магистрального нефтепровода подтвердили возможность практического применения анализа экстремальных значений для определения максимальной скорости коррозии и повышения эффективности мероприятий по ревизии трубопроводов. Таким образом, был сделан вывод о том, что статистическое моделирование способно обеспечить оценку максимальной скорости коррозии при частичной ВТД трубопровода и, следовательно, экономии финансовых и временных ресурсов.

Ключевые слова

статистические методы анализа; внутритрубное техническое диагностирование; магистральные трубопроводы; распределение Гумбеля; критерий согласия Андерсона-Дарлинга; анализ экстремальных значений

Для цитирования

Боровикова С.А., Бриков А.В. Анализ экстремальных значений для обработки данных внутритрубного технического диагностирования // Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 6. С. 219-227. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-6-219-227>.

Original article

ANALYSIS OF EXTREME VALUES FOR DATA PROCESSING OF IN-LINE TECHNICAL DIAGNOSTICS

Sofya A. Borovikova, Alexander V. Brikov

Sakhalin Energy LLC, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Corresponding author

Sofya A. Borovikova, Sofiya.Borovikova@sakhalin2.ru

Abstract. The pipeline system plays an important role in the structure of enterprises engaged in the transportation of significant volumes of oil and gas over long distances. However, steel pipelines are subject to corrosive factors, which can lead to defects and a reduced service life. Statistical analysis methods have recently been increasingly used to maintain structural reliability and ensure safe operation of equipment, both in the oil and gas industries. One method of statistical modeling is extreme value analysis, which can be used to extrapolate data from random inspection checks to non-investigated areas. The article is devoted to the assessment of the possibility of using statistical methods for analyzing data of in-line technical diagnostics (ITD) to ensure the integrity of trunk pipelines. The ITD results of one section of the export pipeline were used to determine the maximum corrosion rate of the entire length of the pipeline by extrapolating the Gumbel statistical distribution. The algorithm for constructing the Gumbel distribution is given. Plotting the autocorrelation function was used as a method for determining the independence of measurements. The belonging of the analyzed sample to the Gumbel distribution was confirmed by calculating the Anderson-Darling consent criterion. The ITD results of the remaining sections of the oil export pipeline confirmed the possibility of using extreme analysis to determine the maximum corrosion rate and increase the efficiency of pipeline inspection measures. Thus, it was concluded that statistical modeling is able to provide an estimate of the maximum corrosion rate during partial pipeline ITD and, therefore, savings in financial and time resources.

Keywords

statistical methods of analysis; in-line technical diagnostics; main pipelines; Gumbel distribution; the Anderson-Darling consent criterion; analysis of extreme values

For citation

Borovikova S.A., Brikov A.V. Analiz ekstremal'nyh znachenij dlya obrabotki dannyh vnutritrubnogo tekhnicheskogo diagnostirovaniya // [Analysis of extreme values for data processing of in-line technical diagnostics] // *Neftegazovoe delo* — *Petroleum Engineering*, 2023, Vol. 21, No. 6. pp. 219-227. [in Russian]. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-6-219-227>.

Введение

Общество с ограниченной ответственностью «Сахалинская Энергия» ведет освоение Пильтун-Астохского и Лунского месторождений на северо-восточном шельфе острова Сахалин. В ходе производственного процесса Общество осуществляет добычу, транспортирование, переработку и реализацию нефти и природного газа. Нефть и газ, добываемые на платформах Пильтун-Астохская-А (ПА-А) и Пильтун-Астохская-Б (ПА-Б), подготавливаются на платформах и транспортируются на узел пуска и приёма средств очистки и диагностики «Чайво» по отдельным трубопроводам. Затем два газопровода и два нефтепровода объединяются, образуя один нефтепровод и один газопровод. Узел пуска и приёма средств очистки и диагностики «Чайво» обо-

рудован камерами пуска/приёма средства очистки и диагностики (СОД). На платформе ЛУН-А углеводороды разделяются на сырой газ, конденсат и воду без осуществления полного цикла подготовки. Вода отделяется и утилизируется на платформе, а сырой газ и конденсат по двум трубопроводам направляются на объединенный береговой технологический комплекс (ОБТК), где происходит подготовка газа и стабилизация газового конденсата [1].

Конденсат смешивается с потоком из северного нефтепровода и перекачивается по единому береговому нефтепроводу на терминал отгрузки нефти (ТОН). Подготовленный газ смешивается с сухим газом от ПА-А и ПА-Б и транспортируется по наземному газопроводу на завод по производству сжижен-

ного природного газа (СПГ). Интегрированная система трубопроводов имеет ключевое значение для успешной реализации проекта [1]. Система трубопроводов введена в эксплуатацию в начале 2009 года. Проектный срок службы газо- и нефтепроводов составляет 30 лет. Для достижения проектного срока эксплуатации внедрены мероприятия по обеспечению контроля и мониторинга коррозии, а также контроля технического состояния трубопроводов.

Трубопроводная система подвержена влиянию коррозионно-агрессивных факторов (растворенный CO_2 , сульфатвосстанавливающие бактерии и др.). Регулярные диагностические мероприятия позволяют оценить техническое состояние трубопроводов и обеспечить их безопасную эксплуатацию. Одним из данных мероприятий является ВТД, которая за последние 10-15 лет нашла широкое применение на объектах транспорта нефти и газа. К достоинствам ВТД относятся: отсутствие необходимости вывода трубопроводов из эксплуатации; возможность обнаружения всех типов дефектов, их местоположения, размера и формы на внутренней и внешней поверхности стенки; возможность инспекции протяженных участков и другие. В свою очередь использование метода ВТД сопряжено с рядом недостатков, а именно: требуется уточнение данных о наличии, размере, местоположении, типе дефектов и проведение дополнительного дефектоскопического контроля (ДДК); затрудненная проходимость некоторых участков в зависимости от геометрии; необходимость поддержания движения дефектоскопа с нужной скоростью; необходимость выполнения длительных подготовительных мероприятий, высокая стоимость.

ВТД является надежным инструментом определения технического состояния трубопроводов и, следовательно, обеспечения его безопасной эксплуатации [2]. Однако, провести диагностику каждого участка трубопровода не всегда возможно из-за ограниченности времени, средств, а также отсутствия возможности проведения ВТД в некоторых зонах. По этой причине приобретает актуальность разработка методов математической обработки данных, на основании которых возможно сделать вывод о состоянии недоступного для инспекции участка. Возможность применения методов статистического анализа, в частности анализа экстремальных значений,

для подземных трубопроводов определена в [3]. В данной работе проведена оценка возможности применения анализа экстремальных значений для статистической обработки данных ВТД определенного участка трубопровода и экстраполяции полученных данных на всю длину трубопровода для получения наиболее статистически вероятного максимального утонения и максимальной скорости коррозии.

Существует большое количество исследований, описывающих применение статистических методов анализа для прогнозирования скорости коррозионных повреждений различных объектов. Так в [4] показана применимость статистики экстремальных значений для оценки максимальной глубины питтинга фундамента и днища нефтяного резервуара и времени образования трещин в трубках теплообменника, отмечена важность предварительной классификации исходных данных по принадлежности к коррозионным механизмам. В [5] представлен метод статистического анализа экстремальных значений для оценки минимальной остаточной толщины трубок теплообменников, включая аппараты воздушного охлаждения и кожухотрубные теплообменники. Эффективность инспекции оценивалась в соответствии с условиями [3]. Было установлено, что оптимальным размером выборки является 20–30 трубок независимо от их количества в теплообменнике. В [6] применена экстраполяция статистического распределения экстремальных значений для оценки участков трубопроводной системы нефтяной платформы, недоступных для инспекции. Анализ показал, что для большей части системы риск утечки в течение запланированного срока службы был незначительным, однако проведенная работа обозначила необходимость получения дополнительной информации для двух конкретных участков. В [7] для прогнозирования максимальной скорости локальной коррозии использовали распределение Гумбеля. В качестве исходных данных для анализа использовались результаты измерения локальных повреждений образцов-свидетелей коррозии, которые экспонировались в промысловом трубопроводе в течение определенного времени. В [8] представлен анализ экстремальных значений смоделированных инспекционных данных подверженного коррозионному воздействию участка трубопровода, которые имеют Гауссово и экспоненци-

альное распределение методом нахождения уровня возврата (return level). Наилучшие результаты были получены при использовании размера выборки из 16 — 25 минимумов. В [9] для изучения внутренней коррозии газопроводов был проведен анализ экстремальных значений для равномерной и питтинговой коррозии. Результаты показывают хорошее соответствие между наблюдаемыми и модельными скоростями коррозии на восьми промысловых трубопроводах влажного газа.

В данной статье описано применение анализа экстремальных значений для прогнозирования максимального утонения стенки нефтепровода Чайво-ТОН длиной 789 км на основании данных ВТД одного его участка.

Основным условием статистической обработки данных и построения модели инспектируемого участка является его репрезентативность по отношению к остальным участкам трубопровода.

Учитывая, что механизмы и скорость внешней коррозии могут сильно различаться по длине трубопровода, например, из-за нарушения сплошности защитного антикоррозионного покрытия, коррозионной агрессивности почвы и др. [10], внешняя деградация условию репрезентативности не удовлетворяет и для моделирования коррозионных процессов использоваться не может. Таким образом, невозможность применения данного метода для обработки данных внешней коррозии трубопроводов большой протяженности является одним из его ограничений. Механизмы внутренней деградации развиваются одинаково на всех трех участках нефтепровода, так как он выполнен из углеродистой стали и транспортирует нефть одного состава.

Набор измеренных толщин стенки после проведения ВТД используется для построения функции распределения. Вид функции распределения зависит от механизмов деградации, реализующихся внутри трубопровода. В статье для построения модели использовалось распределение Гумбеля (двойное экспоненциальное распределение).

Алгоритм статистического анализа состоит из нескольких этапов. На первом этапе происходит деление проинспектированной зоны на равные участки. Минимальная длина участка вычисляется путем построения функции автокорреляции для исходного набора данных ввиду необходимости обеспечить отсутствие корреляции между измерениями. На втором

этапе для каждого участка определяется значение максимального утонения стенки трубопровода. Эти значения образуют выборку максимумов, необходимую для вычисления параметров распределения. На следующем этапе проводится анализ выборки на соответствие распределению Гумбеля с помощью критерия Андерсона-Дарлинга. На заключительном этапе строится функция распределения случайной величины, и определяется максимальное утонение.

Проведем анализ экстремальных значений на примере данных ВТД 2010 и 2018 гг. участка нефтепровода НКС2-ТОН длиной 319 км. Сопоставим данные двух ВТД и найдем значение утонения по каждому найденному внутреннему коррозионному дефекту. Для дефектов, обнаруженных только в 2018 году, в качестве предыдущего значения берем номинальную толщину стенки. Основными критериями анализа экстремальных значений [11] являются независимость измерений друг от друга, соответствие выборки предполагаемому закону распределения.

Для определения минимальной длины участка трубопровода, на которой измерения будут являться независимыми друг от друга, построим график функции автокорреляции (рисунок 1) [6, 12, 13].

Автокорреляционная функция в нашем случае представляет собой зависимость корреляции измерений толщин с самими собой от величины сдвига между ними и рассчитывается по формуле:

$$ACF(L) = \frac{\sum_{t=L+1}^n (r_t - \bar{r})(r_{t-L} - \bar{r})}{\sum_{t=1}^n (r_t - \bar{r})^2}, \quad (1)$$

где $ACF(L)$ — автокорреляционная функция; n — объем выборки; r_t — значение утонения, мм; $\bar{r}$ — математическое ожидание, мм; r_{t-L} — значение утонения с задержкой в расстоянии, мм; L — лаг (величина сдвига между измерениями), м.

На оси ординат 0 свидетельствует об отсутствии корреляции, тогда как 1 — о сильной корреляции. Минимальным расстоянием между двумя не влияющими друг на друга дефектами определяется точкой пересечения функции автокорреляции с осью абсцисс.

Из графика видно, что критерий независимости измерений друг от друга соблюдается при расстоянии 120 м. Однако, такой размер участков слишком мал для того, чтобы максимумы были репрезентативными экстремумами распределения. Стандартной методоло-

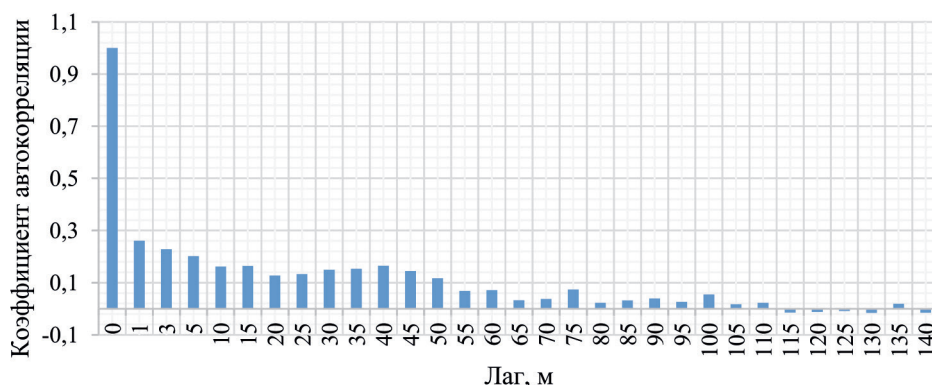


Рисунок 1. График функции автокорреляции

Figure 1. Graph of the autocorrelation function

гии деления участков трубопровода на блоки не существует. В этой связи авторы использовали подход, описанный в [12]. Этот подход заключается в получении выборки путем поиска доказательств справедливости перечисленных выше допущений для инспекционных данных, а именно: обеспечение независимости измерений друг от друга, соответствия выборки предполагаемому закону распределения.

Расчет максимального утонения проводился с использованием модели распределения экстремальных значений Гумбеля [5]. Трубопровод состоит из N участков, причем n из них проинспектированы. Данные об измеренных максимальных потерях стенки располагали в порядке возрастания, при этом утонение на каждом участке записывали как x_i :

$$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq x_4 \leq \dots \leq x_n,$$

где $1 \leq i \leq n$ и i обозначает i -ю точку данных в порядке возрастания.

Эмпирическая функция распределения вероятностей максимальных утонений, определенная по выборке максимумов, была рассчитана по формуле:

$$P_i = \frac{i}{n+1}, \quad (2)$$

где P_i — вероятность возможного значения случайной величины; n — объем выборки; i — порядковый номер измерения.

Предположим, что генеральная совокупность максимальных утонений на всех участках и выборка из нее подчиняются закону распределения экстремальных значений Гумбеля, запишем функцию плотности распределения $f(x)$ в виде:

$$f(x) = \frac{1}{\delta} \cdot \exp\left(-\frac{x-\lambda}{\delta}\right) \cdot \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-\lambda}{\delta}\right)\right), \quad (3)$$

где $f(x)$ — функция плотности распределения по закону Гумбеля, λ и δ — параметры местоположения и масштаба соответственно, и функцию распределения $F(x)$ в виде:

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-\lambda}{\delta}\right)\right). \quad (4)$$

По формуле (5) определим уменьшенную переменную Гумбеля (reduced variate):

$$y = \frac{x-\lambda}{\delta}, \quad (5)$$

где y — уменьшенная переменная Гумбеля.

Отсюда следует, что

$$F(y) = \exp\left(-\exp(-y)\right) \quad (6)$$

и

$$x = \delta \cdot y + \lambda. \quad (7)$$

Уменьшенная переменная Гумбеля для i -й точки данных может быть рассчитана по формуле:

$$y_i = -\ln(-\ln(F_i)) = -\ln(-\ln(P_i)). \quad (8)$$

Для генеральной совокупности (т.е. всех значений утонений нефтепровода Чайвотон) значению максимального утонения будет соответствовать значение накопленной вероятности по теоретической функции распределения F (рисунок 2):

$$F = \frac{N-1}{N}, \quad (9)$$

где N — совокупность всех участков общей длиной 789 км.

Максимальная потеря стенки металла трубопровода, приведенная на рисунке 2, рассчитана по формуле:

$$x_N = \delta \cdot \left(-\ln\left(-\ln\frac{N-1}{N}\right)\right) + \lambda, \quad (10)$$

где x_N — максимальная потеря стенки на всей длине трубопровода Чайвотон.

Параметры местоположения и масштаба, λ и δ , были рассчитаны с использованием ме-

тогда максимального правдоподобия [5]. Максимизируем натуральный логарифм функции распределения (3) для нахождения неизвестных параметров λ и δ :

$$\sum_{i=1}^n \left[\ln\left(\frac{1}{\delta}\right) - \frac{x_i - \lambda}{\delta} - \exp\left(-\frac{x_i - \lambda}{\delta}\right) \right]. \quad (11)$$

Начальные значения для максимизации определяются по формулам (12) и (13):

$$\delta_{\text{ном}} = \frac{\sigma \cdot \sqrt{6}}{\pi}, \quad (12)$$

$$\lambda_{\text{ном}} = \mu - 0.5772 \cdot \delta_{\text{ном}}, \quad (13)$$

где σ и μ — стандартное отклонение и среднее значение измеренных данных соответственно, $\lambda_{\text{ном}}$ и $\delta_{\text{ном}}$ — начальные значения параметров местоположения и масштаба.

Исходя из описанного выше подхода к формированию выборки максимумов и деления на блоки, необходимо подобрать такую длину участка, чтобы, во-первых, измерения были независимыми друг от друга (минимальное расстояние 120 м), во-вторых, распределение выборки соответствовало предполагаемому закону распределения и, в-третьих, каждое измерение из выборки являлось репрезентативным максимумом генеральной совокупности. Чтобы удовлетворить перечисленным требованиям, участок трубопровода НКС2–ТОН длиной 319 км разделили на 29 равных частей по 11 км и в каждой части определили максимальное значение утонения стенки. Таким образом, получим выборку максимумов. Подтверждение соответствия полученной выборки распределению Гумбеля провели с помощью критерия согласия Андерсона-Дарлинга. Данный критерий зачастую является наиболее подходящим для проверки принадлежности анализируемой выборки распределению Гумбеля, поскольку он более чувствителен к отклонениям в хвостах распределений [5].

В критерии Андерсона-Дарлинга статистика определяется как разность между вероятностями каждой точки выборки максимумов и ее соответствующим значением в теоретическом распределении Гумбеля, затем эти разности суммируются для вывода результата в виде одного числового значения. Расчет проводили по формуле:

$$A^2 = -n - \sum_{i=1}^n \frac{2i-1}{n} \{ \ln(F(x_i)) + \ln[1 - F(x_{n+1-i})] \}, \quad (14)$$

где A^2 — статистика Андерсона-Дарлинга, $F(x_i)$ — эмпирическая функция распределения, $F(x_{n+1-i})$ — теоретическая функция распределения.

Влияние размера выборки для распределения Гумбеля [15] определяли по формуле:

$$A^* = A^2 \left(1 + \frac{0.2}{\sqrt{n}} \right) \quad (15)$$

где A^* — статистика Андерсона-Дарлинга с поправкой на размер выборки.

Для подтверждения соответствия выборки распределению Гумбеля статистика Андерсона-Дарлинга должна быть меньше критического значения теоретического распределения, соответствующему принятому уровню значимости. Задавшись 5 %-ным уровнем значимости, определим критическое значение по таблице [15]. Критическое значение составило 0,757. В свою очередь, значение статистики Андерсона-Дарлинга составило 0,576, что свидетельствует о принадлежности анализируемой выборки распределению Гумбеля.

По формуле (5) рассчитали число Гумбеля, график зависимости которого от измеренной толщины стенки приведен на рисунке 3. График на рисунке 3 позволяет оценить соответствие выборки максимумов закону распределения экстремальных значений Гумбеля, и насколько данный закон подходит для прогнозирования ожидаемого утонения на всей длине нефтепровода.

На рисунке 2 показан график распределения вероятности максимального утонения стенки.

Значения накопленной вероятности и максимальная потеря стенки на всей длине нефтепровода Чайво-ТОН рассчитаны по формулам 9 и 10.

Максимальная потеря толщины стенки с внутренней стороны по данным ВТД для нефтепровода НКС-2-ТОН длиной 319 км составляет 3,021 мм. Максимальная скорость коррозии с учетом 8 лет между ВТД при таком утонении равна 0,378 мм/год. Полученное в ходе математического анализа значение максимального утонения для нефтепровода Чайво-ТОН длиной 789 км (экстраполяция в 2,5 раза) составляет 3,891 мм. Другими словами, на всей протяженности трубопровода потеря стенки не превысит 3,891 мм. Соответственно, рассчитанная скорость коррозии равна 0,486 мм/год.

Проверка результатов моделирования максимального утонения стенки нефтепровода

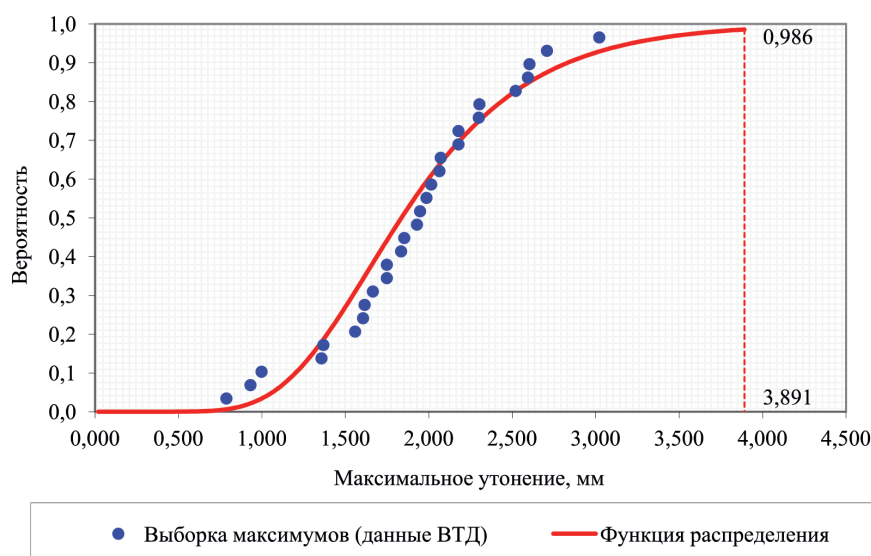


Рисунок 2. График распределения вероятности максимального утонения стенки

Figure 2. Plot of maximum wall thinning probability distribution

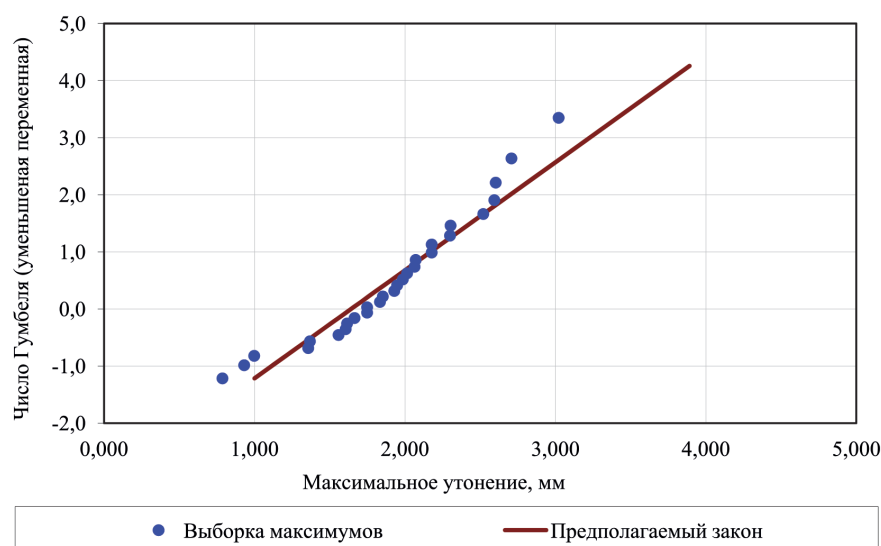


Рисунок 3. Зависимость числа Гумбеля от максимального утонения

Figure 3. Dependence of Gumbel number on maximum thinning

осуществлена путем сравнения с фактическими результатами ВТД двух оставшихся участков (Чайво-ОБТК и ОБТК-НКС-2). Максимальное утонение внутренней стороны стенки на участке Чайво-ОБТК по данным ВТД 2022 г. составляет 1,050 мм, на участке ОБТК-НКС-2 по данным ВТД 2021 г. — 1,995 мм. Значение, полученное в результате математической обработки результатов ВТД, несмотря на высокую степень консервативности, является наибольшим на всей протяженности трубопровода.

Необходимо отметить, что скорость коррозии, рассчитанная представленным методом, не является постоянной величиной и может

измениться как в большую, так и меньшую сторону при проведении ДДК. Если в процессе проведения ДДК выяснится, что фактическая глубина обнаруженного при ВТД дефекта отличается, тогда процедуру статистического анализа необходимо повторить. При этом производится перерасчет скорости коррозии и остаточного срока эксплуатации.

Данный статистический подход целесообразно использовать, например, для разветвленных сетей промышленных трубопроводов, транспортирующих среду одинаковой коррозионной агрессивности, при условии, что скорость внутренней коррозии превосходит скорость внешней коррозии. При отсутствии воз-

возможности проведения внутритрубного технического диагностирования некоторых участков трубопроводной системы применение экстраполяции статистического распределения экстремальных значений может стать эффективным инструментом для предупреждения аварий на трубопроводах и защиты окружающей среды.

Выводы

Анализ экстремальных значений может быть применен для планирования объема и периодичности ВТД. Статистическое моделирование позволит обеспечить оценку максимальной скорости коррозии при частичной ВТД трубопровода и, следовательно, экономию финансовых и временных ресурсов.

Статистические методы анализа находят большое применение в нефтяной и газовой

промышленности, в особенности для обеспечения безопасной эксплуатации объектов трубопроводного транспорта. В работе был применен метод анализа экстремальных значений для обработки данных ВТД одного из участков магистрального нефтепровода. Приведен алгоритм построения распределения Гумбеля для участка нефтепровода. Принадлежность анализируемой выборки распределению Гумбеля была доказана с помощью критерия согласия Андерсона-Дарлингга. По результатам сравнения расчетных данных максимального утонения стенки нефтепровода и фактических результатов ВТД двух оставшихся участков подтверждена возможность практического применения описанной методики для повышения эффективности мероприятий по ревизии трубопроводов.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Исламгулова Г.Ф., Аникина М.В. Транс-сахалинский трубопровод. Пилтун-Астохское и Лунское месторождение // *The Scientific Heritage*. 2020. № 6. С. 36-39.
2. Виноградова И.Л. Актуальность внутритрубной диагностики для нефтегазопромышленности // *Экономика и социум*. 2014. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnost-vnutritrubnoy-dagnostiki-dlya-neftegazopromyshlennosti> (дата обращения: 15.09.2023).
3. Risk-based Inspection Methodology. API 581. 2016.
4. Shibata T. Application of Extreme Value Statistics to Corrosion // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 1994. Vol. 99. No. 4. P. 327-336.
5. David Wang W. Extreme Value Analysis of Heat Exchanger Tube Inspection // ASME 2006 Pressure Vessels and Piping/ICPVT-11 Conference. 2006. Vol. 7. P. 305-313.
6. Schneider Ch. Application of Extreme Value Analysis to Corrosion Mapping Data // *NDT.net*. 2009. Issue 2010-01.
7. Шестаков А.А. Статистические методы анализа коррозии // *Инженерная практика*. 2012. № 05. URL: <https://glavteh.ru/issue/%d0%b8%d0%bd%d0%b6%d0%b5%d0%bd%d0%b5%d1%80%d0%bd%d0%b0%d1%8f-%d0%bf%d1%80%d0%b0%d0%ba%d1%82%d0%b8%d0%ba%d0%b0-2012-05/> (дата обращения: 15.09.2023).
8. Benstock D., Cegla Fr. Extreme Value Analysis (EVA) Of Inspection Data and Its Uncertainties // *NDT & E International*. 2017. Vol. 87. P. 68-77. DOI: 10.1016/j.ndteint.2017.01.008.
9. Yuan Wu K., Mosleh A. Probabilistic Model for Internal Uniform/Pitting Corrosion of Gas pipelines // Conference: Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 14. 2018.
10. Кадакин В.П. Контроль коррозионного состояния магистральных нефтепроводов на основе внутритрубной диагностики // *Территория Нефтегаз*. 2008. № 10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontrol->

[korroziionnogo-sostoyaniya-magistralnyh-nefteprovodov-na-osnove-vnutritrubnoy-dagnostiki](#) (дата обращения: 15.09.2023).

11. Benstock D. Extreme Value Analysis of Ultrasonic Thickness Measurements: A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. 2016
12. Benstock D., Cegla Fr. Sample Selection for Extreme Value Analysis of Inspection Data Collected from Corroded Surfaces // *Corrosion Science*. 2016. Vol. 103. P. 206-214. DOI: 10.1016/j.corsci.2015.11.020.
13. Zaiontz Ch. Autocorrelation Function | Real Statistics Using Excel. URL: real-statistics.com. (accessed 15.09.2023).
14. Zaiontz Ch. One-Sample Anderson-Darling Test. URL: <https://real-statistics.com/non-parametric-tests/goodness-of-fit-tests/anderson-darling-test/> (accessed 15.09.2023).
15. Zaiontz Ch. One-Sample Anderson-Darling Test Table. URL: <https://real-statistics.com/statistics-tables/anderson-darling-test-table/> (accessed 15.09.2023).

REFERENCES

1. Islamgulova G.F., Anikina M.V. Trans-sahalinskij truboprovod. Pil'tun-Astohskoe i Lunscoe mestorozhdenie [Trans-Sakhalin pipeline. Piltun-Astokhskoje and Lunscoje fields]. *The Scientific Heritage*, 2020, No. 6, pp. 36-39. [in Russian].
2. Vinogradova I.L. Aktual'nost' vnutritrubnoj diagnostiki dlya neftegazopromyshlennosti [Relevance of In-Line Diagnostics for The Oil and Gas Industry]. *Ekonomika i socium — Economics and Society*, 2014. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnost-vnutritrubnoy-dagnostiki-dlya-neftegazopromyshlennosti> (accessed 15.09.2023). [in Russian].
3. Risk-based Inspection Methodology. API 581. 2016.
4. Shibata T. Application of Extreme Value Statistics to Corrosion. *Journal of Research of the National Institute of*

Standards and Technology, 1994, Vol. 99, No. 4, pp. 327-336.

5. David Wang W. Extreme Value Analysis of Heat Exchanger Tube Inspection. *ASME 2006 Pressure Vessels and Piping/ICPVT-11 Conference*, 2006, Vol. 7, pp. 305-313.

6. Schneider Ch. Application of Extreme Value Analysis to Corrosion Mapping Data. *NDT.net*, 2009, Issue 2010-01.

7. Shestakov A.A. Statisticheskie metody analiza korrozii [Statistical Methods of Corrosion Analysis] *Inzhenernaya praktika — Engineering Practice*, 2012, No. 05. Available at: <https://glavteh.ru/issue/%d0%b8%d0%bd%d0%b6%d0%b5%d0%bd%d0%b5%d1%80%d0%bd%d0%b0%d1%8f-%d0%bf%d1%80%d0%b0%d0%ba%d1%82%d0%b8%d0%ba%d0%b0-2012-05/> (accessed 15.09.2023). [in Russian].

8. Benstock D., Cegla Fr. Extreme Value Analysis (EVA) Of Inspection Data and Its Uncertainties. *NDT & E International*, 2017, Vol. 87, pp. 68-77. DOI: 10.1016/j.ndteint.2017.01.008.

9. Yuan Wu K., Mosleh A. Probabilistic Model for Internal Uniform/Pitting Corrosion of Gas pipelines. *Conference: Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 14*. 2018.

10. Kadakin V.P. Kontrol' korrozionnogo sostoyaniya magistral'nyh nefteprovodov na osnove vnutritrubnoj

diagnostiki [Corrosion Monitoring of Trunk Oil Pipelines Based on In-Line Diagnostics]. *Territoriya Neftegaz — Neftegaz Territory*, 2008, No. 10. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontrol-korrozionnogo-sostoyaniya-magistralnyh-nefteprovodov-na-osnove-vnutritrubnoj-diagnostiki> (accessed 15.09.2023). [in Russian].

11. Benstock D. *Extreme Value Analysis of Ultrasonic Thickness Measurements*: A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. 2016

12. Benstock D., Cegla Fr. Sample Selection for Extreme Value Analysis of Inspection Data Collected from Corroded Surfaces. *Corrosion Science*, 2016, Vol. 103, pp. 206-214. DOI: 10.1016/j.corsci.2015.11.020.

13. Zaiontz Ch. *Autocorrelation Function | Real Statistics Using Excel*. Available at: real-statistics.com. (accessed 15.09.2023).

14. Zaiontz Ch. *One-Sample Anderson-Darling Test*. Available at: <https://real-statistics.com/non-parametric-tests/goodness-of-fit-tests/anderson-darling-test/> (accessed 15.09.2023).

15. Zaiontz Ch. *One-Sample Anderson-Darling Test Table*. Available at: <https://real-statistics.com/statistics-tables/anderson-darling-test-table/> (accessed 15.09.2023).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Софья Агакишиевна Боровикова, инженер-коррозионист сектора материаловедения и защиты от коррозии, ООО «Сахалинская Энергия», Южно-Сахалинск, Россия

Sofya A. Borovikova, corrosion engineer, Materials science and corrosion protection sector, Sakhalin Energy LLC, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Sofiya.Borovikova@sakhalin2.ru

Александр Валериевич Бриков, кандидат технических наук, начальник сектора материаловедения и защиты от коррозии, ООО «Сахалинская Энергия», Южно-Сахалинск, Россия

Alexander V. Brikov, candidate of technical sciences, head of Materials science and corrosion protection sector, Sakhalin Energy LLC, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Статья поступила в редакцию 15.08.2023; одобрена после рецензирования 12.09.2023; принята к публикации 30.11.2023.

The article was submitted 15.08.2023; approved after reviewing 12.09.2023; accepted for publication 30.11.2023.