**АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ ОТКАЗОВ ДЛИТЕЛЬНО
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ****ANALYSIS OF EMERGENCY FAILURE
OF LONG-TERM OPERATED GAS PIPELINES****И. Р. Байков**
Igor R. BaikovУфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская ФедерацияUfa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation**Н. М. Дарсалия**
Nana M. DarsaliaУфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская ФедерацияUfa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation**С. В. Китаев**
Sergei V. KitaevУфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская ФедерацияUfa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation**О. В. Смородова**
Olga V. SmorodovaУфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская ФедерацияUfa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation**А. М. Шаммазов**
Airat M. ShammazovУфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская ФедерацияUfa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

В настоящее время бесперебойная подача природного газа потребителям является залогом стабильности экономики РФ. Газотранспортная система ПАО «Газпром» находится в стадии длительной эксплуатации, требуя при этом значительных инвестиций на поддержание ее в работоспособном состоянии. В связи с этим актуальными являются задачи анализа статистических данных по авариям для поддержания работоспособности газотранспортной системы в условиях длительной эксплуатации.

В статье выполнен анализ распределения аварий на магистральных газопроводах по дистанции от компрессорной станции. Объем выборки составил 169 аварий, произошедших на 56 газопроводах условным диаметром DN 700-1400 за десятилетний период.

Получено, что характер функции плотности распределения отказов подчиняется закону Вейбулла. Анализ результатов позволил установить, что функция распределения вероятности безотказной работы Вейбулла достаточно точно описывает экспериментальные данные вероятности безотказной работы. Среднеквадратическая относительная погрешность составила 2,28 %.

Различие эмпирической (полученной по экспериментальным данным) и теоретической функций вероятности безотказной работы прослеживается при значительной наработке газопроводов в период, когда повышаются риски внезапных отказов.

В работе предложена трехпараметрическая функция Гомперца для характеристики вероятности безотказной работы магистральных газопроводов, позволяющая учитывать реальные процессы старения и условия эксплуатации газопроводов. Произведен сравнительный анализ рассматриваемых теоретических распределений.

Ключевые словагазотранспортная система,
аварийный отказ,
вероятность безотказной работы,
работоспособность

Анализ полученных результатов показал, что функция распределения вероятности безотказной работы Гомперца описывает экспериментальные данные со среднеквадратической относительной погрешностью, составляющей 2,14 %. Таким образом, распределение Гомперца на 0,2 % точнее распределения Вейбулла.

At present, the uninterrupted supply of natural gas to consumers is the key to the stability of the Russian economy. The gas transmission system of Gazprom PJSC is at the stage of long-term operation, demanding significant investments to maintain it in an efficient condition. In this connection, the problems of accidents statistical data analysis are important to maintain the gas transportation system in the conditions of long-term operation.

The article analyzes the distribution of accidents on the main gas pipelines along the distance from the compressor station. The sample size was 169 accidents occurred on 56 gas pipelines with a nominal diameter of DN 700-1400 for a ten-year period.

It is obtained that the nature of the distribution function of the failure distribution obeys the Weibull law. Results analysis made it possible to establish that the probability distribution function of Weibull's failure-free operation describes the experimental data of the probability of failure-free operation quite accurately. The root-mean-square relative error was 2.28 %.

The difference between the empirical (obtained from experimental data) and the theoretical functions of the probability of failure-free operation can be traced with considerable run-up of gas pipelines in the period when the risks of sudden failures increase.

The paper proposes a three-parameter Gompertz function for characterizing the probability of trouble-free operation of main gas pipelines, which allows to take into account the real aging processes and operating conditions of gas pipelines. A comparative analysis of the theoretical distributions under consideration was made.

An analysis of the results obtained showed that the probability distribution function of Gompertz's fail-safe operation describes experimental data with a mean-square relative error of 2.14 %. Thus, the Gompertz distribution is 0.2 % more accurate than the Weibull distribution.

Key words

gas pipeline system,
emergency failure, probability
of failure-free operation,
working capacity

В условиях длительной эксплуатации газотранспортной системы ПАО «Газпром» определенный интерес представляет анализ аварийности магистральных газопроводов (МГ) в зависимости от удаленности от компрессорной станции (КС).

На рисунке 1 приведена гистограмма распределения аварий, построенная по данным

169 аварий на 56 газопроводах DN 700-1400 за десятилетний период времени 1990–2000 гг.

По мере удаления от КС количество аварий снижается (рисунок 1), что объясняется высоким влиянием режима эксплуатации на работоспособность газопроводов [1, 2]. Для горячих участков газопроводов после КС

Рисунок 1. Гистограмма распределения аварий в зависимости от удаленности от КС ПАО «Газпром»

характерны повышенное давление и нестационарность движения газа [3, 4].

В технических расчетах фактические зависимости обычно аппроксимируют теоретическими плотностями распределения значений признака X [5]. Распределение Пуассона оценивает вероятность появления заданного числа (X) достаточно редких событий.

Применение закона распределения вначале является гипотезой и для установления адекватности его применения необходимо произвести проверку гипотезы по критерию согласия χ^2 , определяемому по формуле:

$$\chi^2_{\text{расч}} = \sum \frac{(f_{\text{ф}} - f_{\text{т}})^2}{f_{\text{т}}}, \quad (1)$$

где $f_{\text{ф}}$ и $f_{\text{т}}$ соответствуют фактическим и теоретическим данным.

Производится сравнение расчетного значения χ^2 с табличным значением при заданном уровне значимости α и числе степеней свободы v . Если расчетное значение χ^2 получилось меньше табличного, то можно считать, что фактическое распределение адекватно теоретическому распределению.

По интервальным рядам была построена гистограмма фактического распределения количества аварий в зависимости от удаленности от КС, при этом интервалы были усреднены. Частота (p_i) и частность (b_i) определялись по

формулам: $p_i = \frac{m_i}{n}$, $b_i = \frac{p_i}{h}$, где h — длина интервала.

На рисунке 2 приведены гистограмма распределения функции $b(L_i)$ и сглаживающая функция $f(L_i)$ для статистических данных. Определим статистические показатели полученного распределения. Расчет показателей распределения для отказов МГ приведен в таблице 1.

Из таблицы 1 следует, что коэффициент вариации признака V большой и составляет величину 16,7 %, что указывает на существенный разброс значений признака относительно средней величины. Высокие значения коэффициента эксцесса E — 56,0 и асимметрии A — 6,2 характеризуют остроконечность кривой распределения и показывают, что распределение количества отказов по дистанции после КС является экспоненциальным.

На рисунке 3 приведена плотность распределения отказов МГ в период 2010-2014 гг. в зависимости от срока службы.

Вид функции плотности распределения отказов МГ (рисунок 3) позволяет предположить, что зависимость вероятности безотказной работы будет характеризоваться распределением Вейбулла [5]. Фактическое и теоретическое распределение вероятности безотказной работы $P(t)$ магистральных газопроводов проиллюстрировано на рисунке 4.

Рисунок 2. Построение сглаживающей кривой функции $f(L_i)$

Таблица 1. Показатели распределения для отказов МГ

Наименование объекта	Показатель					
	$\bar{x}$	σ^2	σ	V	A	E
МГ	53,5	80,2	9,0	16,7	6,2	56,0

Рисунок 3. Плотность распределения отказов МГ в период 2010–2014 гг. в зависимости от срока службы

Функциональные зависимости, приведенные на рисунке 4, показывают, что при помощи распределения Вейбулла можно достаточно хорошо описать фактические данные.

Для оценки отклонения фактических экспериментальных данных от расчетных использовалась среднеквадратическая относительная погрешность:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P^*(t_i) - P(t_i))^2}{\sum_{i=0}^n P^{*2}(t_i)}} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Произведя расчеты, получим величину среднеквадратической погрешности — 2,28 %, следовательно, предложенная теоретическая функция достаточно точно описывает экспериментальные данные.

Вероятность отказов МГ особенно высока на этапе длительной эксплуатации. Наибольшее расхождение эмпирической и теоретической функций распределения вероятности безотказной работы наблюдается в конечной стадии эксплуатации газопроводов.

Для характеристики отказов технических систем может быть также применена трехпараметрическая функция Гомперца, рассмотренная в работах [6, 7] для насосного оборудования:

$$P(t) = \exp(-k_1 \cdot t - k_2(e^{k_3 t} - 1)). \quad (7)$$

В распределении (7) коэффициент k_1 характеризует внешние воздействия, коэффициенты k_2 и k_3 характеризуют износ системы. Примем $k_2 = 0$, тогда получим классическое показательное распределение.

Рисунок 4. Распределение вероятности безотказной работы $P(t)$ по всем отказам МГ ($N = 26$, $\lambda_0 = 6,66 \cdot 10^6$, $\alpha = 13,064$)

Следует ожидать, что распределение Гомперца (7) более точно опишет вероятность безотказной работы МГ. На рисунке 5 приведены фактическое и теоретическое (Гомперца) распределения вероятности безотказной работы $P(t)$ для газопроводов.

На основе проведенных расчетов установлено, что трехпараметрическая функция распределения вероятности безотказной работы Гомперца описывает экспериментальные дан-

ные со среднеквадратической относительной погрешностью, равной 2,14 %. Получено, что распределение Гомперца на 0,2 % точнее распределения Вейбулла.

Таким образом, предложенная трехпараметрическая функция отказов МГ, учитывающая внешние факторы, позволяет с большей степенью точности описывать реальные процессы старения, а также условия эксплуатации, чем двухпараметрическая.

Рисунок 5. Распределение вероятности безотказной работы $P(t)$ по всем отказам МГ ($N = 26$, $k_1 = 0,148$, $k_2 = 1,84 \cdot 10^{-6}$, $k_3 = 43,635$)

Выводы

1. Произведен анализ распределения аварий на магистральных газопроводах в зависимости от расстояния от КС. Установлен экспоненциальный закон распределения аварий в зависимости от удаленности от КС.

2. Показано, что распределение времени безотказной работы $P(t)$ магистральных газопроводов подчиняется закону распределения Вейбулла. Среднеквадратическая относительная погрешность отклонения экспериментальных данных от расчетных значений составляет 2,28 %.

3. Предложена трехпараметрическая функция распределения вероятности безотказной работы Гомперца для характеристики времени безотказной работы $P(t)$ магистральных газопроводов. Преимущества распределения Гомперца заключаются в раздельном учете факторов — внешних воздействий и износа трубопроводов. Анализ полученных результатов показал, что распределение Гомперца на 0,2 % точнее распределения Вейбулла.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Прогнозирование коррозионно-механических разрушений магистральных трубопроводов / А.Г. Гареев, И.А. Иванов, И.Г. Абдуллин, А.И. Забазнов, В.И. Матросов, В.В. Новоселов. М.: ИРЦ «Газпром», 1997. 155 с.

2. Сергеева Т.К., Вольский Э.Л., Мазепа А.Г. и др. Испытание трубных сталей методом «стресс-теста» // Газовая промышленность. 1998. № 7. С. 57–59.

3. Зорин А.Е. Причины возникновения трещиноподобных дефектов на газопроводах // Газовая промышленность. 2012. № 5. С. 54–57.

4. Байков И.Р., Китаев С.В., Шаммазов И.А. Методы повышения энергетической эффективности трубопроводного транспорта природного газа. СПб.: Недра, 2008. 440 с.

5. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям СПб.: Наука, 2001. 295 с.

6. Байков И.Р., Шайбаков Р.А., Елисеев М.В., Китаев С.В., Петров М.Г., Рязанов Н.Р. Надежность «го-

рячих» циркуляционных насосов на нефтехимических заводах // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2017. № 4. С.62–68.

7. Байков И.Р., Смородов Е.А., Ахмадуллин К.Р. Методы анализа надежности и эффективности систем добычи и транспорта углеводородного сырья. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. 275 с.

REFERENCES

1. Gareev A.G., Ivanov I.A., Abdullin I.G., Zabaznov A.I., Matrosov V.I., Novoselov V.V. *Prognozirovanie korrozionno-mekhanicheskikh razrushenii magistral'nykh truboprovodov* [Forecasting of Corrosion-Mechanical Fractures of Main Pipelines]. Moscow, IRC «Gazprom» Publ., 1997. 170 p. [in Russian].

2. Sergeeva T.K., Vol'skii E.L., Mazepa A.G. e. a. Ispytanie trubnykh stalei metodom «stress-testa» [Pipe Steel «Stress-Test»] *Gazovaya promyshlennost' — Gas Industry*, 1998, No. 7, pp. 57–59. [in Russian].

3. Zorin, A.E. Prichiny vozniknoveniya treshchinopodobnykh defektov na gazoprovodakh [Crack-Like Defects Causes on Gas Pipelines]. *Gazovaya promyshlennost' — Gas Industry*, 2012, No. 5, pp. 54–57. [in Russian].

4. Baikov, I.R., Kitaev S.V., Shammazov I.A. *Metody povysheniya energeticheskoi effektivnosti truboprovodnogo transporta prirodnogo gaza* [The Methods of Increasing the Energetical Efficiency of Natural Gas Pipeline]. Saint-Petersburg, Nedra Publ., 2008. 440 p. [in Russian].

5. Vadzinskii R.N. *Spravochnik po veroyatnostnym raspredeleniyam* [Handbook of Probability Distributions]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2001. 295 p. [in Russian].

6. Baikov, I.R., Shaibakov R.A., Eliseev M.V., Kitaev S.V., Petrov M.G., Ryazapov N.R. Nadezhnost' «goryachikh» tsirkulyatsionnykh nasosov na neftekhimicheskikh zavodakh [The Reliability of the «Hot» Circulation Pumps at Petrochemical Plants]. *Territoriya «NEFTEGAZ» — Territory «NEFTEGAZ»*, 2017, No. 4, pp. 62–68. [in Russian].

7. Baikov, I.R., Smorodov E.A., Akhmadullin K.R. *Metody analiza nadezhnosti i effektivnosti sistem dobychi i transporta uglevodorodnogo syr'ya* [Methods for Analysis of Reliability and Efficiency in Hydrocarbon Production and Transport Systems]. Moscow, ООО «Недра-Бизнесцентр» Publ., 2003. 275 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Байков Игорь Равильевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Igor R. Baikov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Heat Power Industry Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

Дарсалия Нана Малхазиевна, аспирант кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Nana M. Darsaliya, Post-Graduate Student of Transport and Storage of Oil and Gas Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

Китаев Сергей Владимирович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Sergei V. Kitaev, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Transport and Storage of Oil and Gas Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: Svkitayev@mail.ru

Смородова Ольга Викторовна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Olga V. Smorodova, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Heat Power Industry Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: olga_smorodova@mail.ru

Шаммазов Айрат Мингазович, д-р техн. наук, профессор, член диссертационного совета, УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Airat M. Shammazov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Member of Thesis Board, USPTU, Ufa, Russian Federation