проведения ремонтных мероприятий либо снижения рабочего давления. Метод полезен для применения в задачах планирования и перераспределения объемов капитального ремонта МГ по участкам ГТС с различными требованиями к поддержанию величины рабочего давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. База данных информационной системы оценки технического состояния объектов ЕСГ «Инфотех» ОАО «Оргэнергогаз». – Режим доступа: https://www.oeg.gazprom.ru.
2. СНиП 2.05.06-85*. Магистральные трубопроводы / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП Минстрой РФ, 1998. – 60 с.
3. СТО Газпром 2-2.3-112-2007. Методические указания по оценке работоспособности участков магистральных газопроводов с коррозионными дефектами. – М.: ООО ИРЦ Газпром, 2007. – 62 с.
4. Длин, А.М. Математическая статистика в технике / А.М. Длин. – М.: Сов. наука, 1958. – 460 с.

УДК 621.644.029:620.197

ИМИТАЦИОННЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОРРОЗИОННОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

А. Ю. Прокопенко, С. В. Нефёдов
ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий «Газпром ВНИИГАЗ», Московская область, Россия

Одним из основных методов обработки результатов ВТД магистральных газопроводов является статистический метод [1] с использованием показательного закона распределения глубины дефектов (рис. 1), обнаруженных при проведении ВТД. Приведем основные расчетные формулы этого метода.

Общее количество труб с коррозионными дефектами на линейном участке газопровода n, включая трубы с рангом опасности коррозионных дефектов (величина, характеризующая степень опасности обнаруженных дефектов в зависимости от их геометрических размеров) менее 0,25, вычисляют по формуле

$$n = \frac{m_{0,25}}{\exp(-0,25/\gamma)}, \qquad (1)$$

где $m_{0,25}$ – коэффициент численно равный количеству обнаруженных при ВТД труб с коррозионными дефектами, максимальный ранг опасности которых больше или равен 0,25;

γ – параметр закона распределения рангов опасности коррозионных дефектов, вычисляемый по формуле

$$\gamma = \frac{0,15}{\ln[m_{0,25} / m_{0,4}]}, \qquad (2)$$

где $m_{0,25}$, $m_{0,4}$ – коэффициенты, численно равные количеству обнаруженных при ВТД труб с коррозионными дефектами, максимальный ранг опасности которых больше или равен, соответственно, 0,25 и 0,4.

Прогноз коррозионного состояния линейного участка МГ по результатам ВТД заключается в оценке изменения по времени $t_э^n$ количества труб $M_{R_K > R_{Kg}}(t_э^n)$ с коррозионными дефектами, ранг опасности $R_к$ которых превышает заданное значение ранга опасности $R_{кg}$:

$$M_{R_K > R_{Kg}}(t_э^n) = \exp(-R_{kg} / \gamma(t_э^n)) \cdot n(t_э^n), \qquad (3)$$

где $R_{kg} = 0,3 M_{R_K > 0,3}(t_э^n)$ – количество труб с потенциально опасными, критическими и закритическими коррозионными дефектами; при $R_{kg} = 0,6 M_{R_K > 0,6}(t_э^n)$ – количество труб с критическими и закритическими коррозионными дефектами; при $R_{kg} = 1$ $M_{R_K > 0,6}(t_э^n)$ – количество труб с закритическими коррозионными дефектами;

$\gamma(t_э^n)$ – параметр закона распределения рангов опасности коррозионных дефектов на момент времени $t_э^n$;

$n(t_э^n)$ – общее количество труб с коррозионными дефектами на момент времени $t_э^n$.

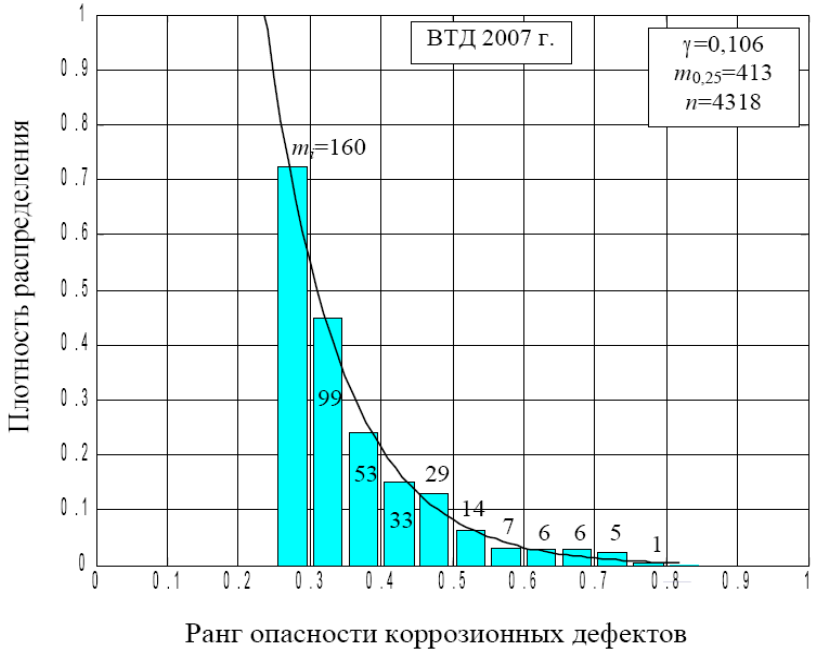
Параметр закона распределения рангов опасности коррозионных дефектов $\gamma(t_э^n)$ в зависимости от времени эксплуатации $t_э^n$ вычисляют по формуле

$$\gamma(t_э^n) = \gamma + V_\gamma \cdot t_э^n \quad , \qquad (4)$$

где γ – параметр закона распределения рангов опасности коррозионных дефектов на линейном участке МГ;

V_γ – скорость изменения параметра закона распределения рангов опасности коррозионных дефектов, 1/лет.

Плотность распределения рангов опасности коррозионных дефектов, определенных для дефектных труб на одном из участков газопровода



Прогноз числа труб с коррозионными дефектами на одном из участков газопровода

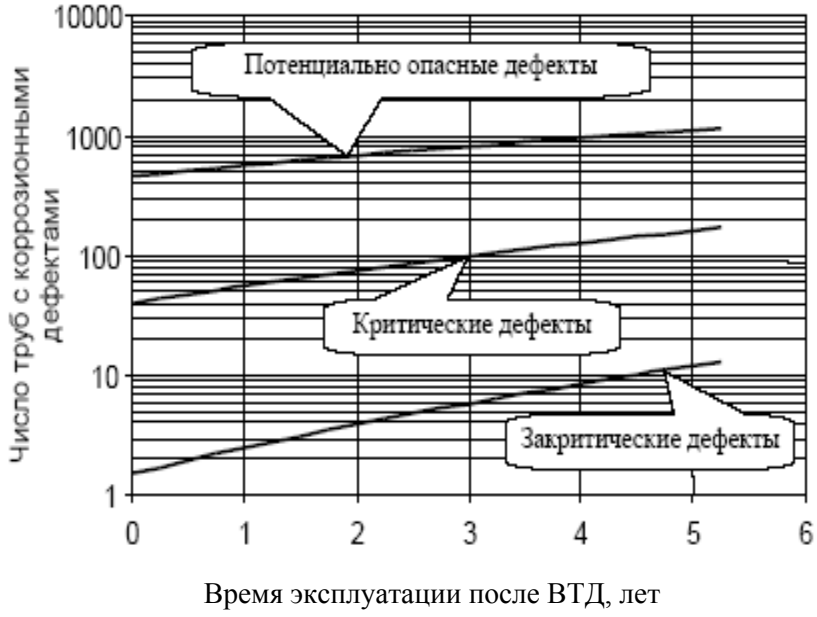


Рис. 1. Плотность распределения рангов опасности коррозионных дефектов и прогноз числа труб с коррозионными дефектами на одном из участков ЛЧ МГ согласно методу, используемому в [1]

Общее количество труб с коррозионными дефектами $n(t_э^n)$ в зависимости от времени эксплуатации линейного участка МГ $t_э^n$ вычисляют по формуле

$$n(t_э^n) = n + V_n \cdot t_э^n, \tag{5}$$

где V_n – скорость изменения общего количества труб с коррозионными дефектами, 1/лет.

В этой статье предлагается альтернативная имитационная модель прогнозирования развития коррозионных дефектов с использованием оптимизационных алгоритмов, схематично представленная на рис. 2, позволяющая учесть возникновение новых дефектов.

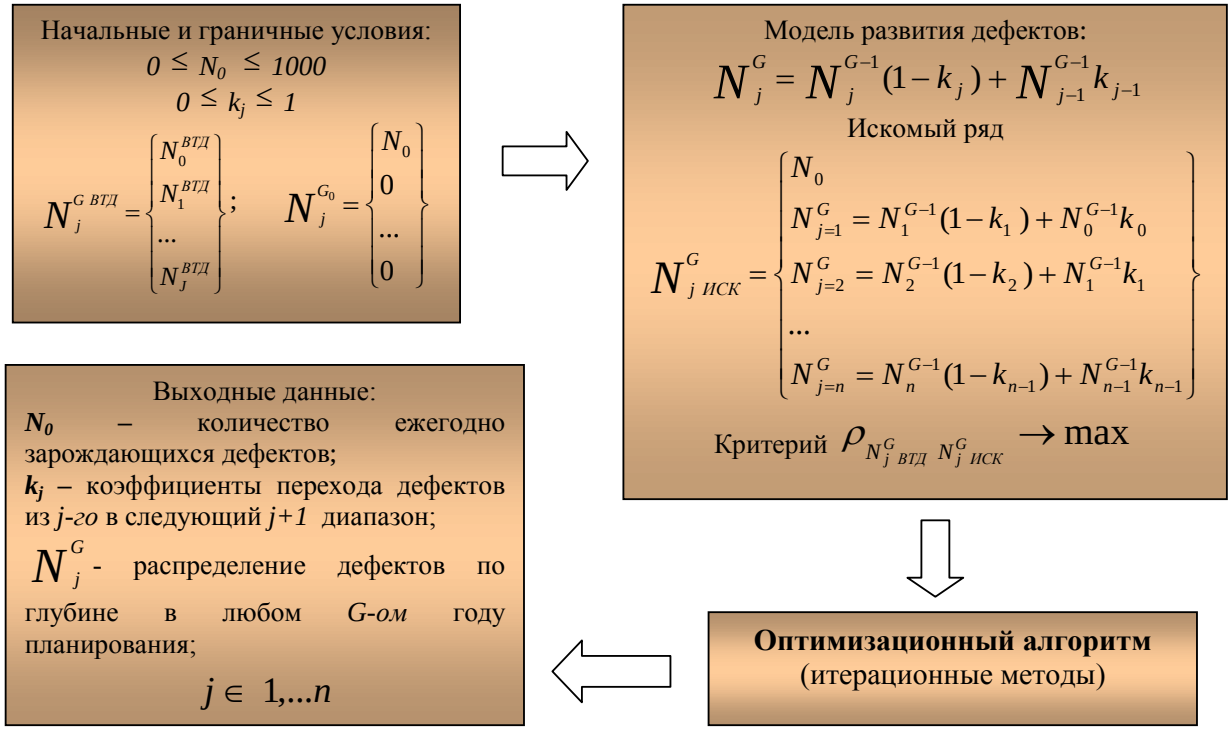


Рис. 2. Модель прогнозирования роста количества и распределения коррозионных дефектов

В основе метода (модели) заложены следующие предпосылки:

– дата возникновения первых дефектов принята через 6 (для труб с пленочной изоляцией) и 10 (для труб с битумной изоляцией) лет после окончания строительства;

– зародившиеся дефекты развиваются и растут неравномерно, поэтому скорость коррозии на различных локальных участках не оценивается, скорость роста дефектов в каждом диапазоне относительных глубин

(максимальная глубина дефекта, отнесенная к толщине стенки трубы) определяется коэффициентами перехода k_j дефектов из предыдущего j-того в последующий j +1-й диапазон относительных глубин:

$$N_j^g = N_j^g\left(1-k_j\right) + N_{j-1}^{g-1}k_{j-1}, \qquad (6)$$

где N_j^g – количество дефектов в j-том диапазоне значения относительных глубин в g-том году;

k_j – коэффициент перехода дефектов из i-того диапазона в i + 1 диапазон относительных глубин;

k_{j-1} – коэффициент перехода дефектов из i – 1 диапазона в i-тый диапазон относительных глубин.

$N_j^g\left(1-k_j\right)$ – количество «остающихся» дефектов в i-том диапазоне относительных глубин к g-тому году, не переходящее в следующий диапазон;

$N_{j-1}^{g-1}k_{j-1}$ – количество дефектов, переходящих в j-тый диапазон относительных глубин в g-том году;

– коэффициенты перехода k_j принадлежат интервалу $0 \le k_j \le 1$;

– начальное количество ежегодно возникающих дефектов принято в диапазоне $0 \le N_0 \le 1000$.

Прогнозируемое количество зарождающихся дефектов и коэффициенты перехода определяются по критерию максимизации коэффициента корреляции между искомой моделью частоты распределения дефектов $N_{иск\,j}^{2010}$ и имеющейся частотой распределения этих дефектов на основе обработки данных ВТД на момент моделирования:

$$\rho_{N_j\,N_{иск\,j}} \to \max, \qquad (7)$$

$$N_{иск\,j} = (N_{иск\,1}, N_{иск\,2}, \ldots N_{иск\,m}), \quad j \in J, \quad J \subseteq M = \{0,\ 1, \ldots,\ m\};$$

$$N_j^g = N_j^g\left(1-k_j\right) + N_{j-1}^{g-1}k_{j-1}, \quad g \in G, \quad G \subseteq R = \{6,\ 7, \ldots,\ r\}.$$

При максимизации коэффициента корреляции частота распределения относительной глубины дефектов учитывалась в диапазоне от 12% (среднего порога чувствительности снарядов-дефектоскопов) до максимальной на участке.

Для количественной оценки взаимосвязи этих рядов распределений дефектов использован коэффициент корреляции, представляющий собой

ковариацию двух наборов данных, деленную на произведение их стандартных отклонений:

$$\rho_{N_J N_{искJ}} = \frac{Cov(N_J, N_{искJ})}{\sigma_{N_J} \cdot \sigma_{N_{искJ}}}, \qquad (8)$$

где $Cov(N_J, N_{искJ})$ – уравнение для коэффициента ковариации (среднее произведение отклонений точек данных от относительных средних):

$$Cov(N_J, N_{иск\ J}) = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(N_j - \bar{N}_j)(N_{иск\ j} - \bar{N}_{иск\ j}), \qquad (9)$$

где N_j, $N_{иск\ j}$ – выборочные средние значения массивов;

$\bar{N}_j$, $\bar{N}_{иск\ j}$ – относительные средние значения массивов;

σ_{N_J}, $\sigma_{N_{иск\ J}}$ – стандартные отклонения:

$$\sigma^2_{N_J} = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(N_j - \bar{N}_j)^2, \ \sigma^2_{N_{искJ}} = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(N_{иск\ j} - \bar{N}_{иск\ j})^2 \qquad (10)$$

В результате создана расчетная модель развития дефектов, определяющая количество ежегодно зарождающихся дефектов N_0, количество дефектов N_j^g в каждом диапазоне относительных глубин в g-том году планирования и коэффициенты перехода k_j. Использован симплексный метод линейного программирования. Модель позволяет определить распределение дефектов в любом году планирования.

Моделирование проводилось на трех участках ЛЧ МГ ГТС ОАО «Газпром», где имеются результаты ВТД ООО «Трансгаз Ухта», ООО «Трансгаз Сургут», ООО «Трансгаз Томск». На всех участках получены достаточно высокие коэффициенты корреляции ($\rho_{корр} > 0{,}97$). На рис. 3 представлены гистограммы по результатам моделирования на одном из участков ГТС:

В результате моделирования получено:

– количество ежегодно зарождающихся дефектов равно 2202;

– коэффициенты перехода k_j дефектов из j-того диапазона относительных глубин в последующий $j + 1$ диапазон:

– $k_1 = 1$; $k_2 = 1$; $k_3 = 0{,}14$; $k_4 = 0{,}24$; $k_5 = 0{,}25$; $k_6 = 0{,}6$; $k_7 = 0{,}6$; $k_8 = 0{,}6$; $k_9 = 0{,}6$; $k_{10} = 0{,}6$; $k_{11} = 0{,}6$; $k_{12} = 0{,}6$; $k_{13} = 0{,}6$; $k_{14} = 0{,}6$; $k_{15} = 0{,}6$; $k_{16} = 1{,}0$; $k_{17} = 1{,}0$; $k_{18} = 1{,}0$;

– коэффициент корреляции $\rho_{N_j\ Nискj} = 0{,}999$.

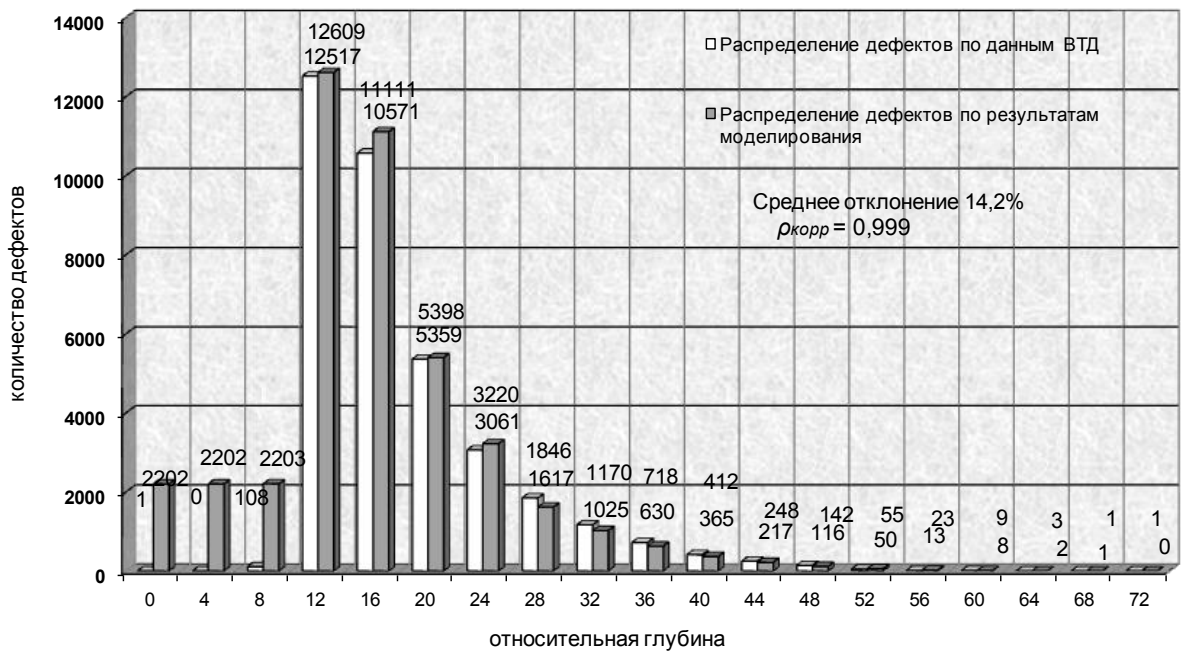


Рис. 3. Распределение коррозионных дефектов по результатам моделирования на выбранном участке ЛЧ МГ ГТС ОАО «Газпром»

В табл. представлено сравнение количества дефектов в диапазонах относительных глубин 0-8 и 8-16 по результатам моделирования и данным ВТД.

Таблица

Сравнение результатов моделирования и данных ВТД

Диапазон относительных глубин	Количество дефектов в диапазоне по данным ВТД	Количество дефектов в диапазоне по результатам моделирования
0 – 8	1	4404
8 – 16	12625	14812

Следует отметить, что величина коэффициента корреляции зависит от величины и границ подбираемых диапазонов относительных глубин. Уменьшение размера диапазонов создает излишне жесткие ограничения и усложняет процедуру поиска решения в модели, увеличение размера диапазонов не дает нужной точности для анализа и дальнейшего прогноза коррозионной поврежденности газопроводов.

Результаты моделирования согласуются с результатами приборных обследований в шурфах и ВТД.

Прогноз развития количества и степени опасности дефектов по годам без учета ремонтов на этом же участке представлен на рис. 4. Цифры в про-

центах – величины относительных глубин дефектов. Для удобства визуального представления диапазон относительной глубины дефектов увеличен.

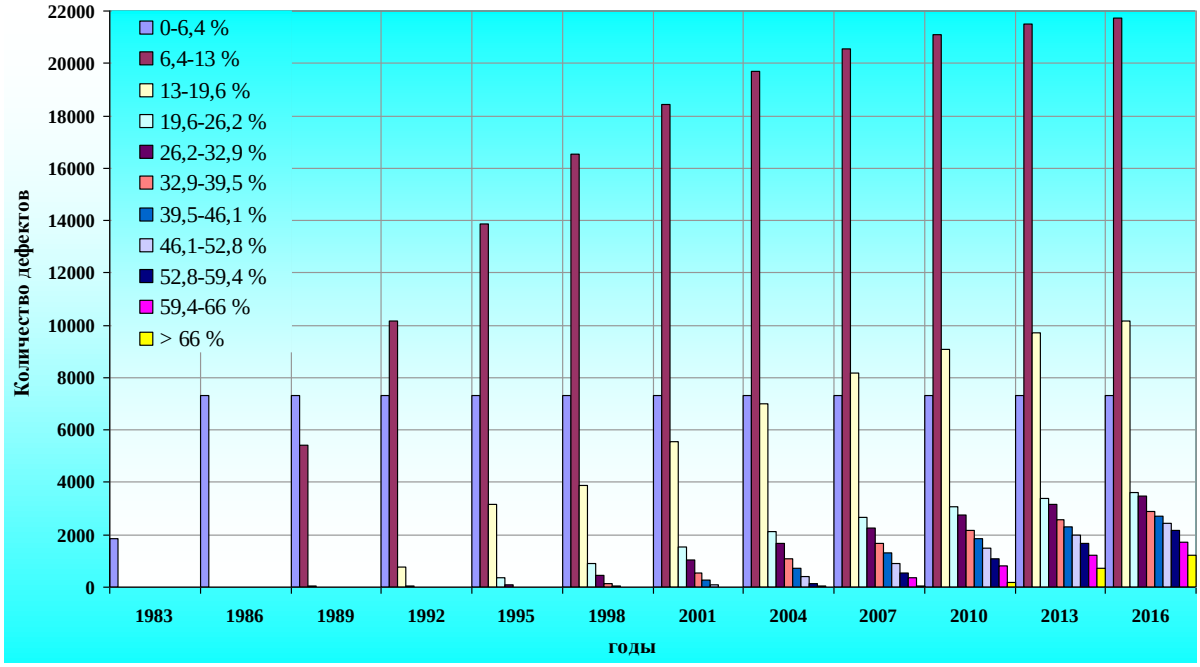


Рис. 4. Прогноз роста количества и степени опасности дефектов в диапазонах относительных глубин на основе предложенной модели без учета проведения ремонтных мероприятий на выбранном для моделирования участке ЛЧ МГ ГТС ОАО «Газпром»

Таким образом, разработанный метод позволяет прогнозировать количество ежегодно зарождающихся коррозионных дефектов, оценивать степень роста дефектов в диапазонах относительных глубин, моделировать распределение степени опасности коррозионных дефектов в любом году планирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. СТО Газпром 2-2.3-361-2009. Руководство по оценке и прогнозу коррозионного состояния линейной части магистральных газопроводов. – М.: ООО «Газпром экспо», 2009. – 47 с.

1. Длин, А.М. Математическая статистика в технике / А.М. Длин. – М.: Сов. наука, 1958. – 460 с.

2. Леоненков, А.В. Решение задач оптимизации в среде MS Excel: монография / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 690 с.

3. База данных информационной системы оценки технического состояния объектов ЕСГ «Инфотех» ОАО «Оргэнергогаз». – Режим доступа: https://www.oeg.gazprom.ru.