

**ՄԵԽԱՆԻԿԱ, ՄԵՔԵՆԱԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆ,
ՄԵՔԵՆԱՇԻՆՈՒԹՅՈՒՆ, ՏՐԱՆՍՊՈՐՏ, ԴԻՉԱՅՆ**

ՄԵԽԱՆԻԿԱ ԵՎ ՄԵՔԵՆԱԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆ

УДК 622.276.279

Մ.Գ. ՏԱԿՅԱՆ, Ա.Ա. ԿԱԶԱՐՅԱՆ

**РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ
ГАЗОПРОВОДОВ**

Учитывая наличие основных факторов, отрицательно воздействующих на несущую способность надземных магистральных газопроводов, разработан новый метод оценки циклической прочности и долговечности ответственных элементов трубопроводов. В отличие от действующего метода точечной оценки только по прочности, с применением предложенного метода возможно выполнение расчетов на прочность и долговечность во всем интервале коррозионно-усталостных циклических напряжений и долговечностей, для чего получены функциональные связи коэффициентов коррозионного воздействия. Использована система уравнений усталости, охватывающая весь спектр коррозионной усталости ($N = 10^1 \dots 10^8$ циклов), и составлены две расчетные схемы: N1 – “воздух - коррозионная среда”, N2 – “коррозионная среда 1 – коррозионная среда 2”, учитывающие влияние коррозионной среды и вариацию её вида на прочность и долговечность. Уточнены интервалы циклических перенапряжений и долговечностей для получения уточненных функциональных связей характеристик несущей способности элементов газопроводов.

Ключевые слова: газотранспортная система, магистральный газопровод, сварной шов трубы, коррозионная усталость, коэффициент коррозионного воздействия, прочность и долговечность.

Введение. На развитие и совершенствование процесса транспортировки природного газа по трубопроводам расходуются значительные материальные и финансовые средства. Межрегиональные газотранспортные системы (ГТС) характеризуются взаимосвязанностью параметров и многообразием режимов нагружения, поэтому главной задачей проектирования ГТС является создание надежной системы ее оптимального развития с точки зрения ресурсосбережения и минимизации капитальных вложений. К проектированию и развитию ГТС предъявляются требования по сокращению сроков и повышению качества проектирования, чего можно достичь комплексным учетом взаимодействующих факторов и математическим моделированием исследуемых процессов [1].

Работоспособность и надежность элементов конструкций ГТС являются главными условиями эффективной работы сложных технологических систем. При этом прочность и долговечность – это главные критерии работоспособности, и обеспечение эксплуатационной надежности элементов конструкции ГТС является основной задачей проектирования указанных систем.

Целью данного исследования является разработка нового расчетного метода определения конструктивных параметров элементов ГТС с учётом коррозионного воздействия среды и усталостных процессов в широком интервале напряжений и долговечностей. Для этого необходимо решить следующие задачи: разработать метод определения коэффициентов коррозионного воздействия во всех интервалах усталости с использованием уравнений выносливости для указанных интервалов; применить антикоррозионные и упрочняющие технологии для повышения характеристик коррозионной выносливости; составить расчетный алгоритм для оценки указанных процессов [2-4].

Постановка задачи и обоснование методики. Конструктивные элементы ГТС, в основном, изготовлены из малоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей, а монтаж трубопроводов выполняется методом электродуговой сварки. При колебаниях давления газа в стенках труб возникает нестационарный режим нагружения. Так как магистральные газопроводы в основном имеют надземное расположение, то к этому добавляются и коррозионные явления, возникающие от атмосферных воздействий, в результате загрязнения воздуха промышленными отходами и выбросами от транспортных средств, которые приводят к возникновению и развитию усталостных повреждений. Учитывая широкий интервал действия напряжённо-деформированного состояния при $\sigma = 400 \dots 870 \text{ МПа}$ (для указанных сталей) и циклических долговечностей $N_i = 10^1 \dots 10^8$ циклов (рис.), для обоснованной оценки несущей способности трубопровода необходимо принять во внимание разнохарактерные усталостные процессы в интервалах: $N_1 = 10^1 \dots 2 \cdot 10^3$ (линии AB , $A_k B_k$, $A'_k B'_k$) - малоциклового, $N_2 = 2 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^6$ - многоциклового (линии BD , $B_k D_k$, $B'_k D'_k$) и $N_3 = 5 \cdot 10^6 \dots 10^8$ - длительной усталости (линии $D - 10^8$, $D_k - 10^8$, $D'_k - 10^8$) [5,6]. В системе координат $(\lg \sigma - \lg N)$ указанные процессы в общем случае описываются линейными регрессионными уравнениями [7, 8]

$$\lg N = (\overline{\lg N} + z_p S_{N_r}) - (\overline{m} + z_p S_m)(\lg \sigma - \overline{\lg \sigma}), \quad (1)$$

или в обобщенном виде

$$\lg N = C - m \lg \sigma, \quad (2)$$

где $C = [(\overline{\lg N} + z_p S_{Nr}) + (\overline{m} + z_p S_m) \overline{\lg \sigma}]$, $m = (\overline{m} + z_p S_m)$ - параметр и показатель наклона линии усталости; $\overline{\lg \sigma}$, $\overline{\lg N}$, \overline{m} - медианные значения циклических напряжений, долговечностей и m ; S_{Nr} , S_m - среднее квадратическое отклонение (с.к.о.) N и m ; z_p - квантиль нормированной функции нормального распределения [8].

Графическая интерпретация систем уравнений (2) приведена на рисунке.

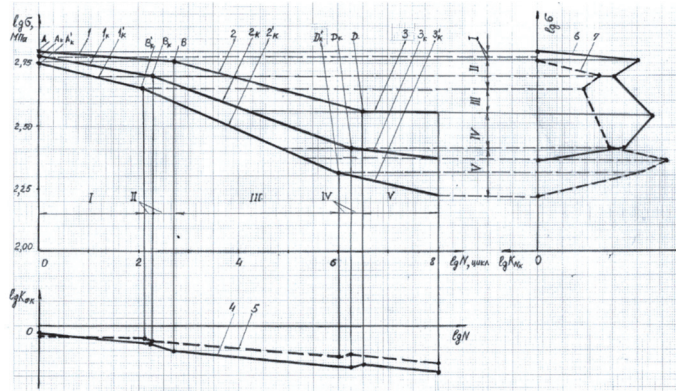


Рис. Комплексные линии усталости: на воздухе (исходные – 1,2,3) и в коррозионных средах (сопоставимые – 1_к, 2_к, 3_к, сравнительные – 1'_к, 2'_к, 3'_к). Участки: малоцикло-вой усталости – 1, 1_к, 1'_к; многоцикло-вой усталости – 2, 2_к, 2'_к; длительной уста-лости – 3, 3_к, 3'_к. Точки перегибов линий усталости: $A(\sigma_{\sigma}, N_0)$, $A_k(\sigma_{\sigma k}, N_0)$, $A'_k(\sigma'_{\sigma k}, N_0)$ - начальные точки; $B(\sigma_{R1}, N_{G1})$, $B_k(\sigma_{Rk1}, N_{Gk1})$, $B'_k(\sigma'_{Rk1}, N'_{Gk1})$ и $D(\sigma_{R2}, N_{G2})$, $D_k(\sigma_{Rk2}, N_{Gk2})$, $D'_k(\sigma'_{Rk2}, N'_{Gk2})$ - точки перегибов между линиями мало-, многоцикло-вой и длительной усталости. Функции: 4 - $K_{\sigma k} = f_1(N)$; 5 - $K'_{\sigma k} = f_2(N)$; 6 - $K_{Nk} = \varphi_1(\sigma)$; 7 - $K'_{Nk} = \varphi_2(\sigma)$

Рассмотрены следующие расчетные схемы: N1 – “воздух-коррозионная среда”; N2 – “коррозионная среда 1 – коррозионная среда 2”, которые позволяют учесть влияние типа коррозионной среды (N1) или фактора (N2), варьирующего процесс коррозионной усталости [9].

Согласно ГОСТ 25.504-82, ГОСТ Р.905-2007 [2, 3] и другим источникам [5, 7, 8, 10, 11], для оценки прочности элементов ГТС предложен коэффициент коррозионного воздействия, учитывающий сопротивление коррозионной усталости указанных элементов только в точках перегибов D , D_k и D'_k (рис.) сопоставимых линий усталости (2)

$$K_{\sigma k} = \sigma_{RN_k} / \sigma_{RN} < 1, \quad (3)$$

где σ_{RN} , σ_{RN_k} – соответственно пределы выносливости элементов на воздухе и в коррозионной среде (рис.).

Данный подход является неполным, т.к. отдельно не учитывает предложенные значения циклических перенапряжений из интервалов σ и не позволяет выполнить оценку срока службы ГТС из-за невозможности расчёта на циклическую долговечность из интервалов N . Для этого предлагается ввод аналогичного коэффициента по долговечности, который не учитывается в [2, 3, 5, 7, 8, 10, 11]:

$$K_{NK} = N_K / N, \quad (4)$$

где N и N_K - циклические долговечности, получаемые из (2) при заданных уровнях циклической прочности σ_{RN} , σ_{RN_k} . Предлагается также ввод коэффициентов (3), (4) для схемы N 2 для расширения возможностей расчетных процедур:

$$K'_{\sigma k} = \sigma'_{RN_k} / \sigma_{RN_k}, \quad K'_{NK} = N'_K / N_K. \quad (5)$$

Результаты исследования. Коэффициенты (3)-(5) являются функциями от N и σ , зависящими от уровня вероятности безотказной работы и вида усталости, которые можно учесть совместным решением сопоставимых уравнений линий усталости. В координатной системе $(\lg \sigma - \lg N)$ для определения параметров функций $K_{\sigma k} = f_1(N)$, $K'_{\sigma k} = f_2(N)$ и $K_{NK} = \varphi_1(\sigma)$, $K'_{NK} = \varphi_2(\sigma)$ необходимо отметить интервалы N и σ (I-V), в пределах которых градиенты уравнений сопоставимых линий усталости остаются неизменными (рис.).

В общем виде для расчетной схемы N1 согласно (2) получено

$$\lg K_{\sigma k} = \lg \sigma_{R_k} - \lg \sigma_R = (C_k / m_k - \lg N / m_k) - (C / m - \lg N / m) = S_1 - M_1 \lg N, \quad (6)$$

$$\lg K_{NK} = \lg N_k - \lg N = (C_k - m_k \lg \sigma) - (C - m \lg \sigma) = \Delta C_k - \Delta m_k \lg \sigma, \quad (7)$$

где $S_1 = (C_k / m_k - C / m)$, $M_1 = (1 / m_k - 1 / m)$, $\Delta C_k = (C_k - C)$, $\Delta m_k = (m_k - m)$.

Аналогично, для расчетной схемы N 2 -

$$\lg K'_{\sigma k} = S'_1 - M'_1 \lg N, \quad \lg K'_{NK} = \Delta C'_k - \Delta m'_k \lg \sigma. \quad (8)$$

Вариация относительного расположения комплексных линий усталости предопределяет вид и характер изменений функций коэффициентов $K_{\sigma k}$, $K'_{\sigma k}$, K_{NK} и K'_{NK} (рис.). Из них $K_{\sigma k} = f_1(N)$ и $K'_{\sigma k} = f_2(N)$ почти прямолинейны и

близко расположены друг к другу, что позволяет получить обобщенное прямолинейное уравнение для указанных функций [8]:

$$y_i = a + bx_i, \quad (9)$$

где $y_i = \lg K_{\sigma k_i}$ и $\lg K_{\sigma k'_i}$, $x_i = \lg N_{Gk_i}$ и $\lg N_{Gk'_i}$.

Учитывая общую тенденцию изменений коэффициентов $K_{Nk \max}$ и $K'_{Nk \max}$, можно получить функции $K_{Nk} = \varphi_1(\sigma)$ и $K'_{Nk} = \varphi_2(\sigma)$ в виде отдельных степенных уравнений [8, 10]:

а) для

$$K_{Nk} = \varphi_1(\sigma) - y_i = a_1 + b_1 x_i + c_1 x_i^2; \quad (10)$$

б) для

$$K_{Nk'} = \varphi_2(\sigma) - y_i = a_2 + b_2 x_i + c_2 x_i^2, \quad (11)$$

где $y_i = \lg K_{Nk}$, $\lg K_{Nk'}$, $x_i = \lg \sigma_{Rk}$, $\lg \sigma_{Rk'}$.

В качестве примера в таблице представлены уравнения функций (6), (7).

Таблица

Функции $K_{\sigma k} = f_1(N)$ и $K_{Nk} = \varphi_1(\sigma)$, расчетная схема N1

N n/n	Интервалы N, σ	Уравнения функций $K_{\sigma k}$	Параметры $\lg K_{\sigma k}$, $i=1, \dots, 5$	
			S_i	M_i
1	I	$\lg K_{\sigma k} = S_1 - M_1 \lg N$	$(C_{k1}/m_{k1} - C_1/m_1)$	$(1/m_{k1} - 1/m_1)$
2	II	$\lg K_{\sigma k} = S_2 - M_2 \lg N$	$(C_{k2}/m_{k2} - C_1/m_1)$	$(1/m_{k2} - 1/m_1)$
3	III	$\lg K_{\sigma k} = S_3 - M_3 \lg N$	$(C_{k2}/m_{k2} - C_2/m_2)$	$(1/m_{k2} - 1/m_2)$
4	IV	$\lg K_{\sigma k} = S_4 - M_4 \lg N$	$(C_{k3}/m_{k3} - C_2/m_2)$	$(1/m_{k3} - 1/m_2)$
5	V	$\lg K_{\sigma k} = (S_{k5} + E_1^*) - M_5 \lg N$	$(C_{k3}/m_{k3} - C_2/m_2) + \lg N_{G2}/m_2$	$1/m_{k3}$
		Уравнения функций K_{Nk}	Параметры $\lg K_{Nk}$, $i=1, \dots, 5$	
			ΔC_{ki}	Δm_{ki}
6	I	$\lg K_{Nk} = \Delta C_{k1} - \Delta m_{k1} \lg \sigma$	$(C_{k1} - C_1)$	$(m_{k1} - m_1)$
7	II	$\lg K_{Nk} = \Delta C_{k2} - \Delta m_{k2} \lg \sigma$	$(C_{k1} - C_2)$	$(m_{k1} - m_2)$
8	III	$\lg K_{Nk} = \Delta C_{k3} - \Delta m_{k3} \lg \sigma$	$(C_{k2} - C_2)$	$(m_{k2} - m_2)$
9	IV	$\lg K_{Nk} = (\Delta C_{k3} + E_2^{**}) - m_{k2} \lg \sigma$	$(C_{k2} - C_2) + m_2 \lg \sigma_{R2}$	m_{k2}
10	V	$\lg K_{Nk} = (\Delta C_{k4} + E_2^{**}) - m_{k3} \lg \sigma$	$(C_{k3} - C_2) + m_2 \lg \sigma_{R2}$	m_{k3}

Примечание: $E_1^* = \lg N_{G2}/m_2$, $E_2^{**} = m_2 \lg \sigma_{R2}$.

Уравнения (9)-(11) выводятся применением стандартных прикладных программ обработки данных с коэффициентом детерминации $D^2 > 0,9$. Учитывая разнообразие и значительный объем вычислительных процедур по оценке несущей способности элементов конструкций газопроводов, целесообразно для расчетных схем N1 и N2 составить алгоритм согласно [4].

Заключение. Предлагается метод комплексной оценки несущей способности конструкций ГТС. Приводятся расчеты по оптимальному определению срока службы конструкций в условиях атмосферного и коррозионного воздействий среды, в широких интервалах циклической прочности σ и долговечности N , которые не учитывались в существующих расчетных схемах. Применение функций коэффициентов (6)-(8) на этапах конструкторских разработок, а также при ремонтно-восстановительных работах ГТС позволяет выполнить следующий комплекс расчетных операций:

- охватить весь интервал σ с учетом его циклического характера и градиента линий усталости;
- определить оптимальный срок службы элементов ГТС, поочередно используя функциональные связи (6)-(8) при заданном интервале долговечностей I-V;
- выполнить вероятностные оценки показателей несущей способности элементов ГТС, что значительно повышает точность и достоверность полученных результатов;
- используя полученные значения σ и N , выполнить расчеты, обеспечивающие минимальную материалоемкость конструкции при заданном сроке службы ГТС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Акопян С.Г., Казарян Ю.А., Хачатрян В.С.** Новые эффективные модели, методы анализа режимов и оптимального проектирования газотранспортных систем: Монография. - Ереван: Изд-во ГИУА, 1997. - 172 с.
2. **ГОСТ 25.С04-82.** Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. – М.: Изд-во стандартов, 1983. - 82 с.
3. **ГОСТ Р9. 905-2007 (ИСО 11845:1995) ЕСЗКС.** Методы коррозионных испытаний. Общие требования. - М.: Стандартинформ, 2007. - 20 с.
4. **Pirumyan N.V., Stakyan M.G., Galstyan G.** Mathematical Modeling of the Test Process of Construction Materials // Proc. of 11 Internat. Conf. on Contemp. Probl. of Architect. and Constr. - Yerevan, RA, oct. 2019. - P. 115-120 (Scopus).
5. **Дунаев П.Ф., Леликов О.П.** Конструирование узлов и деталей машин. – М.: Изд. центр “Академия”, 2008. - 496 с.

6. **Чибухчян Г.С., Чибухчян О.С., Стакян М.Г.** Повышение несущей способности элементов конструкции транспортных средств по критерию коррозионной прочности // Проблемы машиностроения и надежности машин (г. Москва). - 2019. - N 6. - 2019. - С. 74-84 (Scopus).
7. **Скойбеда А.Т., Кузьмин А.В., Макейчик Н.Н.** Детали машин и основы конструирования. – Минск: Высшая школа, 2006. - 560 с.
8. **Степнов М.Н., Шаврин А.В.** Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 2005. - 399 с.
9. **Pirumyan N.V., Stakyan M.G., Galstyan G.** Software Processing of the Test Results of Building Materials // Proc. of 11 Internat. Conf. on Contemp. Probl. of Architect. and Constr. - Yerevan, RA, oct. 2019. - P. 121-128 (Scopus).
10. **Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П.** Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
11. **Орлов Б.Н.** Инновационные технологии обеспечения надежности рабочих элементов и оборудования. – М.: МГУПБ, 2013. - 328 с.

Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ. Հ.Ա. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

ՄԱՅՐՈՒՂԱՅԻՆ ԳԱԶԱՏԱՐՆԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ ՏԱՐՐԵՐԻ ԿՐՈՂՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՄԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԱՅԻՆ ՄԵԹՈԴ

Հաշվի առնելով վերգետնյա մայրուղային գազատարների վրա բացասաբար ազդող հիմնական գործոնների առկայությունը՝ մշակված է խողովակատարների հիմնական տարրերի ցիկլային ամրության և երկարակեցության գնահատման նոր մեթոդ: Ի տարբերություն հաշվարկներում գործող միայն ամրության կետային գնահատման մեթոդի՝ առաջադրված նոր մեթոդով հնարավոր է կատարել երկբնույթ ամրության և երկարակեցության հաշվարկներ կոռոզիոն հոգնածային ցիկլային լարումների և երկարակեցությունների բոլոր միջակայքերում, որի համար ստացվել են կոռոզիոն ներգործման գործակիցների ֆունկցիոնալ կապեր: Օգտագործված է հոգնածային գծերի հավասարումների համակարգը, որն ընդգրկում է կոռոզիոն հոգնածության ողջ տիրույթը ($N = 10^1 \dots 10^8$ ցիկլ), և կազմված են երկու հաշվարկային սխեմաներ. N 1 – «օդ – կոռոզիոն միջավայր», N 2 – «կոռոզիոն միջավայր 1 - կոռոզիոն միջավայր 2», որոնք հաշվի են առնում կոռոզիոն միջավայրի և դրա տեսակի փոփոխության ազդեցությունն ամրության և երկարակեցության վրա: Ճշգրտված են ցիկլային գերլարումների և երկարակեցությունների միջակայքերը՝ գազատարների տարրերի կրողունակության բնութագրիչների ճշգրտված ֆունկցիոնալ կապեր ստանալու համար:

Առանցքային բառեր. գազատրանսպորտային համակարգ, մայրուղային գազատար, խողովակի եռակցման կար, կոռոզիոն հոգնածություն, կոռոզիոն ներգործման գործակից, ամրություն և երկարակեցություն:

M.G. STAKYAN, H.A. GHAZARYAN

A CALCULATION METHOD FOR ESTIMATING THE BEARING CAPACITY OF STRUCTURAL COMPONENTS OF GAS-MAIN PIPELINES

Based on the main damaging factors, affecting the bearing capacity of the above-ground main gas pipelines, a new method of assessing the cyclic strength and durability of critical pipeline elements has been developed. Unlike the current method of point estimate only for strength, by the proposed new method, it is possible to perform calculations for strength and durability in the entire range of corrosion-fatigue cyclic stresses and durations. For this purpose, functional correlation of the coefficients of corrosion effect are obtained. A system of fatigue equations covering the entire range of corrosion fatigue ($N=10^1...10^8$ cycles) is used and 2 calculation schemes are compiled: N1 – “air-corrosive medium”, N2 – “corrosive media 1 - corrosive media 2”, taking into account the influence of the corrosive environment and its option on the strength and durability. The intervals of cyclic overstresses and durations are identified to obtain a refined functional correlation of the characteristics of the bearing capacity of gas pipeline elements.

Keywords: gas transmission system, main gas pipeline, pipe weld, corrosion fatigue, corrosion coefficient, strength and durability.

ՀՏԴ 676.2.017.26

Ա.Ս. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

ՊՈԼԻԳՐԱՖԻԱԿԱՆ ՄԵՔԵՆԱՆԵՐԻ ՏՊՄԱՆ ԳՈՏՈՒՄ ԳՈՐԾՈՆՆԵՐԻ ՀԱՄԱԼԻՐ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ԵՎ ԲԱՐՁՐՈՐԱԿ ՏՊԱՆՅՈՒԹԵՐԻ ՍՏԱՑՈՒՄԸ

Ուսումնասիրվել են տպագրող տպագրությանը մասնակցող բոլոր նյութերի հատկություններն իրենց բարդ կառուցվածքով: Նախագծվել է օգտագործված նյութերի երկրաչափությունը, և ընդունվել են եզրային պայմանները: Տպագրական գործընթացի հիմնական ուժային պարամետրի՝ նորմալ ճնշման որոշման համար օգտագործվել են կոնտակտային խնդիրների լուծման մեթոդները, իսկ տպագրման հպման գոտում ստատիկական և դինամիկական բեռնվածքային ռեժիմների հետազոտման համար օգտագործված է ANSYS ծրագրային փաթեթը:

Առանցքային բառեր. ջերմաստիճան, ջերմային բաշխվածություն, լարումների բաշխվածություն, դեֆորմացիա, 3D մոդելավորում:

Ներածություն. Պոլիգրաֆիական արտադրության ոլորտում տարեցտարի աճող ծավալները, արտադրանքի որակի և ձևավորման նկատմամբ պահանջարկի կտրուկ աճը, ինչպես նաև սպառման նոր շուկաներ նվաճելու ձգտումն ու մրցակցային պայքարը լարված իրավիճակ են ստեղծել պոլիգրաֆիական արտադրա-