УДК 622.692.4.053-049.32

МЕТОДИКА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОТКЛОНЕНИЙ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОПРОВОДА С УЧЁТОМ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

♦♦♦♦♦

METHOD FOR DETERMINING DEVIATIONS IN THE REGIME PARAMETERS OF A GAS PIPELINE TAKING INTO ACCOUNT THE UNCERTAINTY OF THE INITIAL INFORMATION

Стефанов Роман Евгеньевич
АО «Газпром газораспределение Тамбов»
r.stefanov@internet.ru

Аннотация. В статье описано применение методики по определению отклонений основных определяющих параметров газотранспортной системы с учётом неопределённости исходной информации – пропускной способности газопровода, средней по длине газопровода температуры газа и мощности, необходимой для прокачки газа поршневым компрессором. Приведённые соотношения дают возможность проанализировать «вес» каждого из составляющих X_i в общем наборе параметров, определяющих полное отклонение результирующей величины. Однако помимо весовых коэффициентов сопоставлены и относительные погрешности.

Ключевые слова: определение режимных параметров газопровода; неопределённость исходной информации; погрешность определения прогнозных параметров системы; оптимизация системы с определённым гарантированным запасом; пропускная способность газопровода; средняя по длине газопровода температура газа; мощность для прокачки газа поршневым компрессором.

Stefanov Roman Evgenievich
JSC «Gazprom Gas Distribution Tambov»
r.stefanov@internet.ru

Annotation. The article describes the application of the methodology for determining deviations of the main determining parameters of the gas transportation system, taking into account the uncertainty of the initial information – the throughput capacity of the gas pipeline, the average gas temperature along the length of the gas pipeline and the power required to pump gas by a piston compressor. The given relationships make it possible to analyze the «weight» of each of the components X_i in the general set of parameters that determine the total deviation of the resulting value. However, in addition to the weighting factors, relative errors are also compared.

Keywords: determination of the operating parameters of the gas pipeline; uncertainty of the initial information; error in determining the predicted parameters of the system; optimization of the system with a certain guaranteed reserve; throughput capacity of the gas pipeline; average gas temperature along the length of the gas pipeline; power for pumping gas by a piston compressor.

Проектированию и исследованию различных систем, применяемых в газовой промышленности, сопутствует выполнение комплекса всевозможных расчётов, имеющих целью предсказать или проанализировать основные технологические параметры данной системы, такие, как, например, расходы, температуры, мощности и др. Расчёты ведутся на основании определённых моделей, представляющих зависимость интересующих параметров функций f от набора параметров-аргументов x_i:

$$F = f\left(x_1, x_2, x_3, ..., x_n\right). \quad (1)$$

Однако получающиеся при этом значения параметров, определяющие режим работы газопровода, рассчитываются без учёта того, что в исходной информации, закладываемой в систему уравнений, обязательно существуют ошибки, что влечёт за собой погрешности определения искомых режимных параметров. В силу того, что большинство ошибок являются случайными величинами, погрешности параметров также будут носить статистический характер. Отсюда вытекает задача определения режимных параметров газопровода с учётом неопределённости исходной информации. Решение этой задачи позволяет:

1) дать научно обоснованную погрешность определения прогнозных параметров системы;

2) задаваясь определённым доверительным интервалом, вести оптимизацию системы с определённым гарантированным запасом, обеспечивающим изменение параметров f в допустимых интервалах;

3) проанализировать существующие отклонения ΔX_i имеющегося набора X_i; дать рекомендации по уменьшению «допусков» на те из них, которые дают наибольший вклад в результирующее отклонение Δf;

4) проводить количественное сопоставление проектных результатов с данными промышленных испытаний систем.

Для определения результирующего отклонения функции f воспользуемся дисперсионной методикой по аналогии с расчётом размерных цепочек [1], приняв допущение о независимости x_i между собой:

$$\Delta f = K_\Sigma \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(K_i - \frac{\partial f}{\partial x_i}\cdot \Delta x_i \right)^2}\ , \qquad (2)$$

где $K_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_н}$ и $K_\Sigma = \frac{\sigma_\Sigma}{\sigma_н}$ – коэффициенты относительного рассеивания, учитывающие отличие закона распределения i-го и суммарного (Σ) параметров от нормального закона; σ_i, σ_Σ и $\sigma_н$ – соответствующие среднеквадратические отклонения.

В соответствии с формулой (2) для расчёта результирующего отклонения Δf необходимо знать, помимо Δx_i, и их законы распределения, из которых можно определить σ_i и K_i. Что касается закона распределения функции f, то видно, что при достаточно большом числе аргументов x_i, не сильно различающихся по абсолютной величине относительных отклонений,

$$\left.\frac{\Delta x}{x}\right|\max << \sum_{i=1}^{n}\frac{\Delta x_i}{x_i}\ ,$$

случайная величина f в соответствии с теоремой Ляпунова распределена асимптотически нормально. Следовательно, в формуле (2) можно принять $K_\Sigma = 1$.

Окончательно для расчёта рекомендуется использовать зависимость в виде относительных отклонений:

$$\frac{\Delta f}{f} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(K_i \cdot \frac{1}{f}\cdot \frac{\partial f}{\partial x_i}\cdot \Delta x_i \right)^2}\ . \qquad (3)$$

Рассмотрим применение предлагаемой методики к расчёту отклонений основных определяющих параметров газотранспортной системы – пропускной способности q, температуры газа T, потребной на прокачку газа мощности N. Расчётные зависимости получим на основании соотношения (3).

1. Пропускная способность газопровода q (м^3/сут.) определяется согласно [3] по выражению:

$$q = 0{,}326\cdot 10^{-6}\cdot d_{вн}^{2{,}5}\cdot \sqrt{\frac{P_н^2 - P_к^2}{\lambda\cdot\gamma\cdot T_{ср}\cdot Z\cdot L}}\ , \qquad (4)$$

где $d_{вн}$ – внутренний диаметр трубопровода; λ – коэффициент гидравлического сопротивления; γ – относительная плотность газа по воздуху; $T_{ср}$ – средняя температура газа; L – длина трубопровода; Z – коэффициент сжимаемости газа; $P_н$ и $P_к$ – давление в начальной и конечной точках.

После дифференцирования в соответствии с выражением (3) по всем параметрам и преобразований получаем выражение для относительного отклонения расчётного расхода газа:

$$\frac{\Delta q}{q} = \sqrt{\left(\frac{2{,}5\cdot\Delta d_{вн}}{d_{вн}}\cdot K_d\right)^2 + \frac{1}{4}\cdot\left[\left(\frac{\Delta\gamma}{\gamma}\cdot K_\gamma\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{ср}}{T_{ср}}\cdot K_T\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\cdot K_L\right)^2\right] + \left(\frac{P_н^2}{P_н^2 - P_к^2}\cdot\frac{\Delta P_н}{P_н}\cdot K_p\right)^2 + \left(\frac{P_к^2}{P_н^2 - P_к^2}\cdot\frac{\Delta P_к}{P_к}\cdot K_p\right)^2}. \quad (5)$$

2. Определение средней по длине газопровода температуры газа $T_{ср}$ рекомендуется выполнить по соотношению [4]:

$$T_{ср} \cong T_0 + (T_н - T_0)\cdot\left(1 - \frac{\pi\cdot K\cdot d_{вн}\cdot L}{2\cdot G\cdot C_p}\right), \quad (6)$$

где T_0 – температура грунта; $T_н$ – температура газа на входе в газопровод; K – коэффициент теплопередачи к грунту; G и C_p – массовый расход и теплоёмкость газа.

Дифференцирование по соответствующим параметрам и подстановка в выражение (3) даёт следующую формулу для определения относительного отклонения от номинала расчётной средней температуры газа:

$$\frac{\Delta T_{ср}}{T_{ср}} = \frac{1}{1+\frac{T_н}{T_0}\cdot(B-1)}\cdot\sqrt{\left(\frac{\Delta T_0}{T_0}\cdot K_T\right)^2 + \left[\frac{T_н}{T_0}\cdot(B-1)\cdot\frac{\Delta T_н}{T_н}\cdot K_T\right]^2 + \left(\frac{T_н}{T_0}-1\right)^2\times \left[\left(\frac{\Delta K}{K}\cdot K_K\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\cdot K_d\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\cdot K_L\right)^2 + \left(\frac{\Delta G}{G}\cdot K_G\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_p}{C_p}\cdot K_C\right)^2\right]}, \quad (7)$$

где

$$B = \frac{2\cdot G\cdot C_p}{\pi\cdot K\cdot d_{вн}\cdot L}.$$

3. Мощность N, необходимая для прокачки газа поршневым компрессором (л.с.), может быть подсчитана по формуле [5]:

$$N = \frac{10^4\cdot P_1\cdot Q}{60\cdot 75\cdot\eta}\cdot\frac{m}{m-1}\cdot\left(\varepsilon^{\frac{m-1}{m}} - 1\right), \quad (8)$$

где m – показатель политропы; ε – степень сжатия; P – давление на всосе, кгс/см^2; Q – производительность, м^3/мин.; η – механический КПД.

Дифференцирование выражения (8) в соответствии с формулой (3) и преобразование приводят к следующему выражению для определения относительного отклонения от номинала расчётной мощности:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_1}{P_1}\cdot K_p\right)^2 + \left(\frac{\Delta Q}{Q}\cdot K_Q\right)^2 + \left(\frac{\Delta\eta}{\eta}\cdot K_\eta\right)^2 + \left(\frac{m-1}{m}\cdot\frac{1}{1-\varepsilon^{\frac{m-1}{m}}}\cdot\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}\cdot K_\varepsilon\right)^2 + \left(\frac{\ln\varepsilon}{m}\cdot\frac{\varepsilon^{\frac{m-1}{m}}}{\varepsilon^{\frac{m-1}{m}}-1} - \frac{1}{m-1}\right)^2\cdot\left(\frac{\Delta m}{m}\cdot K_m\right)^2}. \quad (9)$$

Приведённые соотношения дают возможность проанализировать «вес» каждого из составляющих X_i в общем наборе параметров, определяющих полное отклонение

результирующей величины. Однако помимо весовых коэффициентов необходимо сопоставлять и относительные погрешности $\frac{\Delta X_i}{X_i}$. Такой анализ и расчёт удобно проводить в табличной форме.

Для примера рассмотрим газопровод со следующими параметрами:

- температура газа на входе в газопровод $T_н$ = 310 °K;
- температура грунта T_0 = 278 °K;
- массовый расход газа G = 0,875 × 10^6 кг/час;
- теплоёмкость газа C_p = 0,6 ккал/кг × °C;
- коэффициент теплопередачи к грунту K = 2 ккал/м^2 × час × °C;
- внутренний диаметр трубопровода dвн = 1 м;
- длина трубопровода L = 120 км;
- давление в начальной точке $P_н$ = 55 кгс/см^2;
- давление в конечной точке $P_к$ = 30 кгс/см^2.

Результаты расчёта $\frac{\Delta q}{q}$ и $\frac{\Delta T_{ср}}{T_{ср}}$ запишем в виде таблиц 1 и 2.

Таблица 1

i		$\frac{\Delta X_i}{X_i} = F_i$, %	K_i	a_i	$F_i \cdot a_i \cdot K_i$	$(F_i \cdot a_i \cdot K_i)^2$
1	$\frac{\Delta d}{d}$	0,1	1	2,5	0,25	0,0625
2	$\frac{\Delta \lambda}{\lambda}$	5	1	0,25	1,25	1,56
3	$\frac{\Delta \gamma}{\gamma}$	2	1	0,25	0,5	0,25
4	$\frac{\Delta T_{ср}}{T_{ср}}$	3	1,73	0,25	1,3	1,68
5	$\frac{\Delta Z}{Z}$	3	1	0,25	0,73	0,53
6	$\frac{\Delta L}{L}$	1	1,73	0,25	0,432	0,186
7	$\frac{\Delta P_н}{P_н}$	1,82	1	1,42	2,58	6,53
8	$\frac{\Delta P_к}{P_к}$	3,33	1	0,425	1,41	2,0

$$\sum_1^8 (F_i \cdot a_i \cdot K_i)^2 = 12{,}8;\ \frac{\Delta q}{q} = 3{,}51\ \%.$$

Здесь

$$a_7 = \frac{1}{1 - \left(\frac{P_к}{P_н}\right)^2},\ a_8 = \frac{1}{\left(\frac{P_н}{P_к}\right)^2 - 1}.$$

Таблица 2

i		$\frac{\Delta X_i}{X_i} = F_i$, %	K_i	a_i	$F_i \cdot a_i \cdot K_i$	$(F_i \cdot a_i \cdot K_i)^2$
1	$\frac{\Delta T_0}{T_0}$	1	1,0	1,0	1,0	1,0
2	$\frac{\Delta T_н}{T_н}$	3	1,0	0,435	1,3	1,7
3	$\frac{\Delta K}{K}$	30	1,0	0,111	3,34	11,2
4	$\frac{\Delta d}{d}$	0,1	1,0	0,111	0,0111	1,22 · 10–4
5	$\frac{\Delta L}{L}$	1	1,73	0,111	0,193	0,037
6	$\frac{\Delta G}{G}$	3	1,73	0,111	0,577	0,333
7	$\frac{\Delta C_p}{C_p}$	1,5	1,0	0,111	0,167	0,028

$$\sum_1^8 (F_i \cdot a_i \cdot K_i)^2 = 14{,}3\,;\ \frac{\Delta T_{cp}}{T_{cp}} = 2{,}64\ \%.$$

Здесь

$$a_2 = \frac{T_н}{T_0} \cdot \left(\frac{2 \cdot G \cdot C_p}{\pi \cdot K \cdot d \cdot L} - 1 \right),\ a_3 = a_4 = \ldots = a_7 = \frac{T_н}{T_0} - 1.$$

Приведённые в таблицах данные по $\frac{\Delta X_i}{X_i}$ и K_i являются весьма приближёнными, и результирующие отклонения параметров Δq и ΔT_{cp} в реальных системах могут отличаться от полученных значений. Однако представленные результаты можно рассматривать в качестве оценок порядков возможных отклонений расчётных (проектных) параметров от номинальных величин.

Из таблиц 1 и 2 следует, что вклад в результирующие отклонения определяется всем набором факторов $\frac{\Delta X_i}{X_i}$, K_i и a_i, и поэтому при проведении расчётов необходим детальный анализ этих факторов по всем параметрам. Такая работа представляется не простой, однако её выполнение даст возможность научно обоснованно оценивать качество газопроводной системы. Например, из результатов расчёта таблицы 1 следует, что для обеспечения прогнозирования расхода $G = 0{,}875 \times 10^6$ кг/час с надёжностью 99,865 % необходимо расчёт вести на расход $G = 0{,}9063 \times 10^6$ кг/час.

Из таблицы 2 следует, что средняя температура газа в том же доверительном интервале может отличаться на ± 7,6 °С от номинального значения.

Рассмотренная методика может быть использована при оценке отклонений технологических параметров и в других системах, применяемых в газовой промышленности. Следует иметь в виду, что при статистическом анализе реальных отклонений ΔX_i могут проявиться сильные корреляционные связи между некоторыми параметрами. В этом случае расчёты необходимо вести по формуле:

$$\frac{\Delta f}{f} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(K_i \cdot \frac{1}{f} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i\right)^2 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} \rho_{ij} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_j} \cdot \frac{\Delta x_i \cdot \Delta x_j}{f^2}}, \quad (10)$$

где ρ_{ij} – коэффициенты корреляции случайных величин ΔX_i и ΔX_j. Эти коэффициенты, как правило, подлежат экспериментальному определению. В условиях полного отсутствия данных по ρ_{ij} допускают следующее приближение:

$$\rho_{ij} = 0 \text{ при } \frac{\partial x_i}{\partial x_j} \le 0; \quad (11)$$

$$\rho_{ij} = 1 \text{ при } \frac{\partial x_i}{\partial x_j} > 0.$$

В этом случае оценки будут завышенными, т.е. выполнены «в запас».

Литература

1. Гусейнзаде М.А. Методы математической статистики в нефтяной и газовой промышленности / М.А. Гусейнзаде, Э.В. Калинина, М.Б. Добкина. – М. : Недра, 1979. – 340 с.
2. Мирзаджанзаде А.Х. Решение задач нефтегазопромысловой механики / А.Х. Мирзаджанзаде, М.А. Гусейнзаде. – М. : Недра, 1971. – 200 с.
3. Борисов С.Н. Гидравлические расчеты газопроводов / С.Н. Борисов, В.В. Даточный. – М. : Недра, 1972. – 112 с.
4. Ходанович И.Е. Тепловые режимы магистральных газопроводов / И.Е. Ходанович, Б.Л. Кривошеин, Р.Н. Бикчентай. – М. : Недра, 1971. – 216 с.
5. Вольский Э.Л. Режим работы магистрального газопровода / Э.Л. Вольский, И.М. Константинова. – Л. : Недра. Ленинградское отделение, 1970. – 168 с.
6. Проектирование и управление газотранспортными системами с учётом стохастических условий работы оборудования / Р.А. Бабанский [и др.] // Проблемы развития автоматизации и механизации процессов добычи, переработки и транспорта газа и газового конденсата: Материалы научно-технической конференции (27–28 марта 2008 года, г. Краснодар). – Краснодар : ООО «Издательский Дом – Юг», 2008. – С. 93–101.
7. Аналитическое решение задачи нестационарного процесса транспорта газа / В.А. Куцев [и др.] // Гипотезы. Поиск. Прогнозы: сборник научных трудов. – Краснодар : ООО «Просвещение-Юг», 2000. – Вып. 9. – С. 278–284.
8. Передаточные функции аналитических решений задач транспорта газа / В.А Куцев [и др.] // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2003. – Т. 10. – № 4. – С. 181–182.
9. Стефанов Р.Е. Анализ состояния магистрального газопровода и моделирование системы «газопровод – массив грунта» // Технические и технологические системы: материалы XIII Международной научной конференции «ТТС-22» (22–24 ноября 2023 года, г. Краснодар). – Краснодар : ООО «Издательский Дом – Юг», 2023. – С. 315–323.
10. Стефанов Р.Е. Практическое значение глинистых грунтов для инженерно-геологической оценки и анализ процессов их набухания // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2023. – № 4. – С. 195–205.
11. Статистическая оценка отклонения параметров системы от номинальных значений / А.С. Трофимов [и др.] // Труды Кубанского государственного технологического университета. – 1999. – Т. 3. – № 1. – С. 54–67.
12. Решение линеаризованных уравнений нестационарного процесса движения газа в трубопроводе / А.С. Трофимов [и др.] // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2002. – Т. 9. – № 2. – С. 470–472.
13. Трофимов А.С. Неизотермическая модель транспорта газа / А.С. Трофимов, В.А. Куцев, Е.В. Кочарян // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2004. – № 2. – URL : https://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Trofimov/Trofimov_2.pdf
14. Трофимов А.С. Отклонения параметров линейной части газопроводов от номинальных значений / А.С. Трофимов // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2005. – Т. 12. – № 4. – С. 1105–1106.

References

1. Huseynzade M.A. Methods of mathematical statistics in the oil and gas industry / M.A. Huseynzade, E.V. Kalinina, M.B. Dobkina. – M. : Nedra, 1979. – 340 p.
2. Mirzajanzade A.Kh. Solution of problems of oil and gas field mechanics / A.Kh. Mirzajanzade, M.A. Huseynzade. – M. : Nedra, 1971. – 200 p.
3. Borisov S.N. Hydraulic calculations of gas pipelines / S.N. Borisov, V.V. Datochny. – M. : Nedra, 1972. – 112 p.
4. Khodanovych I.E. Thermal regimes of main gas pipelines / I.E. Khodanovych, B.L. Krivoshein, R.N. Bikchentai. – M. : Nedra, 1971. – 216 p.
5. Volsky E.L. Operating mode of the main gas pipeline / E.L. Volsky, I.M. Konstantinova. – L. : Nedra. Leningrad branch, 1970. – 168 p.
6. Design and control of gas transportation systems taking into account stochastic operating conditions of equipment / R.A. Babansky [et al.] // Problems of development of automation and mechanization of processes of extraction, processing and transportation of gas and gas condensate: materials of scientific and technical conference (March 27–28, 2008, Krasnodar). – Krasnodar: LLC «Publishing House – Yug», 2008. – P. 93–101.
7. Analytical solution of the problem of non-stationary gas transport process / V.A. Kutsev Babansky [et al.] // Hypotheses. Search. Forecasts: collection of scientific papers. – Krasnodar : LLC «Publishing House – Yug», 2000. – Iss. 9. – P. 278–284.
8. Transfer functions of analytical solutions of gas transportation problems / V.A. Kutsev [et al.] // Review of applied and industrial mathematics. – 2003. – Vol. 10. – № 4. – P. 181–182.
9. Stefanov R.E. Analysis of the state of the main gas pipeline and modeling of the «gas pipeline – soil massif» system // Technical and technological systems: materials of the XIII International scientific conference «TTS-22» (November 22–24, 2023, Krasnodar). – Krasnodar : LLC «Publishing House – Yug», 2023. – P. 315–323.
10. Stefanov R.E. Practical significance of clayey soils for engineering-geological assessment and analysis of their swelling processes // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2023. –№ 4. – P. 195–205.
11. Statistical assessment of deviation of system parameters from nominal values / A.S. Trofimov [et al.] // Works of the Kuban state technological university. – 1999. – Vol. 3. – № 1. – P. 54–67.
12. Solution of linearized equations of non-stationary process of gas motion in a pipeline / A.S. Trofimov [et al.] // Review of applied and industrial mathematics. – 2002. – Vol. 9. – № 2. – P. 470–472.
13. Trofimov A.S. Non-isothermal model of gas transport / A.S. Trofimov, V.A. Kutsev, Kocharyan E.V. // Electronic scientific journal Oil and Gas Business. – 2004. – № 2. – URL : https://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Trofimov/Trofimov_2.pdf
14. Trofimov A.S. Deviations of the parameters of the linear part of gas pipelines from the nominal values / A.S. Trofimov, R.A. Pakhomov, R.Yu. Krupnik // Review of applied and industrial mathematics. – 2005. – Vol. 12. – № 4. – P. 1105–1106.