



# ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

Н. Б. АГАЕВ

*Решены задачи диагностирования динамического состояния трубопроводной системы на основе передаточных функций.*

*Is solved tasks of diagnosing dynamic condition of pipeline systems because of transfer functions.*

Развитие средств автоматики, переход к автоматизации сложных технологических процессов и современным методам управления производством ставят ряд задач, успешное решение которых требует новых способов обработки информационных потоков. Эти способы должны быть основаны на глубоком изучении свойств, законов и динамики процессов, протекающих в функционирующих системах. В частности возникает необходимость в разработке простых, эффективных и достаточно надежных методов определения и прогнозирования не только технологического, но и технологического состояния по текущей информации о выходных и входных сигналах исследуемых систем.

Идея использования передаточных функций в качестве диагностирующих критериев при решении задач диагностирования газодинамического состояния трубопроводных систем предложена в работе [1] и получила дальнейшее развитие в работах [2]. В классическом понимании под словом «диагностика» подразумевается «техническая диагностика». Несмотря на разработку многочисленных методов и внедрение огромного количества приборных методов контроля технологического состояния газопроводных систем, они еще значительно отстают от потребностей практики, не отвечают современным требованиям эксплуатации распределительных систем газоснабжения.

Пренебрегая влиянием внешних факторов, можно утверждать, что всякое изменение состояния диагностируемого объекта приводит к изменению не только его технических параметров, но и параметров протекающих процессов. Так как процесс трубопроводного транспорта газа является сложным технологическим процессом, то может быть построено семейство различных моделей, отражающих различные его особенности.

При решении задач диагностирования технологических ситуаций трубопроводного транспорта газа важно правильно описать поведение самого объекта в конкретных ситуациях. В тоже время при эксплуатации систем трубопроводного транспорта газа (особенно магистральных газопроводов) требуется оперативное, но относительно точное определение состояния системы, так как сама система носит инерционный характер в отношении незначительного изменения газодинамических параметров.

**Постановка задачи.** Параметры газового потока, как правило, имеют стохастическую природу

вследствие влияния на него внешних неконтролируемых факторов, а также случайных погрешностей при их измерениях. В отношении внешних факторов и случайных погрешностей только передаточные функции системы являются инвариантными, так как они зависят от физических характеристик системы и конкретный вид определяется в зависимости от математической модели происходящего в системе процесса. Кроме того, многочисленными исследованиями доказано, что большинство технологических процессов трубопроводного транспорта газа допускает с необходимой для практических расчетов точностью эквивалентирование линейными математическими моделями. Поэтому для дальнейшего исследования в качестве основной модели процессов перекачки газа по горизонтальным участкам газопровода используется линеаризованные уравнения движения газа в трубопроводе.

**Решение задачи.** На основе принятой модели и при известных значениях давления на конечных участках газопровода напишем функции расхода в начале и в конце в безразмерном временном масштабе в изображениях Лапласа:

$$\bar{\tau} = \frac{c^2}{2al^2}t, \quad (1)$$

$$G(0, S) = P(0, S) \frac{\sqrt{S}}{2al} \frac{ch\sqrt{S}}{sh\sqrt{S}} - P(L, S) \frac{\sqrt{S}}{2al} \frac{1}{sh\sqrt{S}}, \quad (2)$$

$$G(L, S) = P(0, S) \frac{1}{2al} \frac{ch\sqrt{S}}{sh\sqrt{S}} - P(L, S) \frac{\sqrt{S}}{2al} \frac{ch\sqrt{S}}{sh\sqrt{S}},$$

где  $2al$  — коэффициент линеаризации по Чарному,  $1/c$ ;  $c$  — скорость звука в газе, м/с;  $L$  — длина газопровода, м;  $S$  — безразмерный параметр преобразования Лапласа;  $P(0, S)$ ;  $P(L, S)$  и  $G(0, S)$ ;  $G(L, S)$  — соответственно функции давления и расхода в начале и в конце газопровода.

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} K_1(S) &= \sqrt{S} \operatorname{cth}\sqrt{S}, \\ K_2(S) &= \sqrt{S} \operatorname{cosech}\sqrt{S}. \end{aligned} \quad (3)$$

Графики функций  $K_1(S)$  и  $K_2(S)$  показаны на рис. 1. Как видно из выражения (3),  $K_1(S)$  и  $K_2(S)$  не зависят от влияния внешних факторов (от характера изменения газодинамических параметров потока) и остаются инвариантными при любом виде

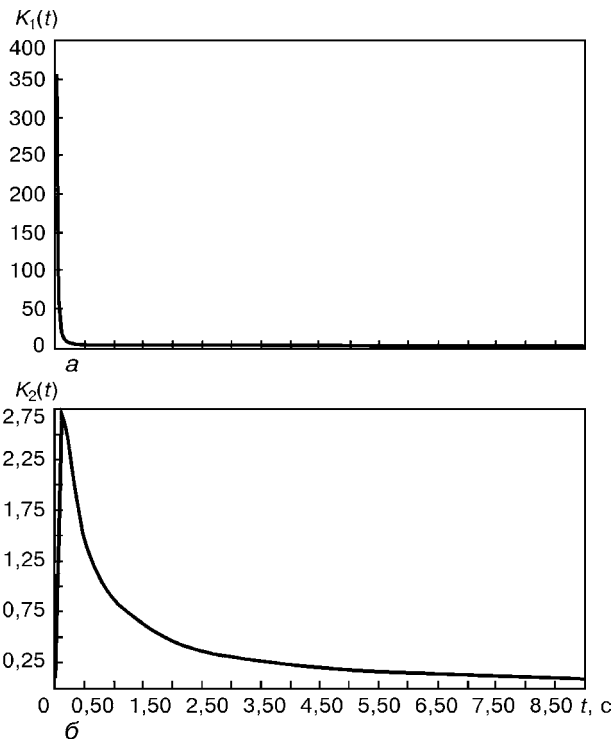


Рис. 1. Зависимости передаточных функций систем  $K_1(t)$  (а) и  $K_2(t)$  (б) от времени

их изменения. Это свойство передаточных функций позволяет использовать ее в качестве эталона при диагностировании газодинамического состояния систем трубопроводного транспорта газа.

Из выражения (2) определяем  $K_1(S)$  и  $K_2(S)$  и, чтобы отличать их от функции (3), обозначим  $\overline{K}_1(S)$  и  $\overline{K}_2(S)$ :

$$\overline{K}_1(S) = \frac{2al}{2} \left[ \frac{G(0, S) + G(L, S)}{P(0, S) - P(L, S)} + \frac{G(0, S) - G(L, S)}{P(0, S) + P(L, S)} \right], \quad (4)$$

$$\overline{K}_2(S) = \frac{2al}{2} \left[ \frac{G(0, S) + G(L, S)}{P(0, S) - P(L, S)} - \frac{G(0, S) - G(L, S)}{P(0, S) + P(L, S)} \right].$$

Суть диагностирования с помощью передаточных функций системы заключается в следующем: передаточные функции, определяемые по формулам (3), при изменении технологических режимов остаются неизменными, поэтому для диагностирования происходящих в системе процессов они используются как эталонные, а функции, определяемые по формулам (4), зависят от изменения технологических параметров режима. Если результаты вычислений по формулам (3) и (4) совпадают, то можно принять, что система функционирует в нормальном режиме, в обратном же случае происходит нарушение технологического режима. В качестве критерия совпадения двух функций можно использовать следующие:

$$R_{\overline{K}_i, \overline{K}_i}(\tau) \approx 1, \quad (5)$$

где

$$\overline{K}_i(\tau) = \int_0^\tau |K_i(t)| dt, \quad (6)$$

$$\overline{K}_i'(\tau) = \int_0^\tau |K_i'(t)| dt,$$

$R_{\overline{K}_i, \overline{K}_i}(\tau)$  — взаимно-корреляционная функция.

Отметим, что при долговременном нормальном функционировании в любой газотранспортной системе становятся стабильными такие статистические параметры газового потока, как математическое ожидание и дисперсия. Кроме того, многочисленные исследования показали, что всякий газодинамический параметр газового потока можно аппроксимировать с практической точки зрения точности гармоническими функциями:

$$f(t) = M_f + \sigma_f \sin \omega_f t. \quad (7)$$

При постоянном значении математического ожидания и дисперсии можно центрировать значение газодинамического параметра  $f(t)$  с помощью подстановки

$$\overline{f}(t) = \frac{f(t) - M_f}{\sigma_f},$$

в результате выполнения которой получена аппроксимирующая функция в виде:

$$\overline{f}(t) = \sin \omega_f t. \quad (8)$$

Действительно, при нормальном режиме функционирования газотранспортная система обладает инерционностью по отношению к газодинамическому параметру газового потока. Поэтому на любом промежутке времени, в течение которого проводится контроль газодинамических параметров, математическое ожидание и дисперсия параметра газового потока не сильно отличаются от их статистически точных значений.

Определим изображение Лапласа (8)

$$f(S) = \frac{\omega_f}{S^2 + \omega_f^2}.$$

Подставляя полученные выражения для каждой функции газодинамического параметра в (5), записываем:

$$\overline{K}_1(S) = \frac{1}{2} [A(S) + B(S)], \quad (9)$$

$$\overline{K}_2(S) = \frac{1}{2} [A(S) - B(S)],$$

где

$$A(S) = \frac{\omega_{G_0} + \omega_{G_L}}{\omega_{P_0} - \omega_{P_L}} \frac{(S^2 + \omega_{G_0}) (S^2 + \omega_{G_L}) (S^2 + \omega_{P_0}^2) (S^2 + \omega_{P_L}^2)}{(S^2 + \omega_{G_0}^2) (S^2 + \omega_{G_L}^2) (S^2 - \omega_{P_0}^2) (S^2 - \omega_{P_L}^2)}, \quad (10)$$



**Динамика падения давления в начале/конце опытного участка промышленного газопровода «Компрессор-завод» при аварийной утечке газа**

$$B(S) = \frac{\omega_{G_0} - \omega_{G_L} (S^2 - \omega_{G_0} \omega_{G_L})(S^2 + \omega_{P_0}^2)(S^2 + \omega_{P_L}^2)}{\omega_{P_0} + \omega_{P_L} (S^2 + \omega_{G_0}^2)(S^2 + \omega_{G_L}^2)(S^2 - \omega_{P_0} \omega_{P_L})} \quad (10)$$

Переход от изображения к оригиналу для  $K_1(S)$  и  $K_2(S)$  не представляет трудности:

$$A(\tau) = \frac{(\omega_{P_0}^2 - \omega_{G_0}^2)(\omega_{P_L}^2 - \omega_{G_0}^2)}{(\omega_{P_0} - \omega_{P_L})(\omega_{G_0}^2 + \omega_{P_0} \omega_{P_L})} \text{Sin } \omega_{G_0} \tau +$$

$$+ \frac{(\omega_{P_0}^2 - \omega_{G_L}^2)(\omega_{P_L}^2 - \omega_{G_L}^2)}{(\omega_{P_0} - \omega_{P_L})(\omega_{G_L}^2 + \omega_{P_0} \omega_{P_L})} \text{Sin } \omega_{G_L} \tau -$$

$$- \frac{(\omega_{G_0} + \omega_{G_L})(\omega_{G_0} \omega_{G_L} - \omega_{P_0} \omega_{P_L}) \sqrt{\omega_{P_0} \omega_{P_L}}}{(\omega_{G_0}^2 - \omega_{P_0} \omega_{P_L})(\omega_{G_L}^2 - \omega_{P_0} \omega_{P_L})} \text{Sh } \sqrt{\omega_{P_0} \omega_{P_L}} \tau,$$

$$B(\tau) = \frac{(\omega_{P_0}^2 - \omega_{G_0}^2)(\omega_{P_L}^2 - \omega_{G_0}^2)}{(\omega_{P_0} + \omega_{P_L})(\omega_{P_0} \omega_{P_L} - \omega_{G_0}^2)} \text{Sin } \omega_{G_0} \tau + \quad (11)$$

$$+ \frac{(\omega_{P_0}^2 - \omega_{G_L}^2)(\omega_{P_L}^2 - \omega_{G_L}^2)}{(\omega_{P_0} + \omega_{P_L})(\omega_{P_0} \omega_{P_L} - \omega_{G_L}^2)} \text{Sin } \omega_{G_L} \tau -$$

$$- \frac{(\omega_{G_0} - \omega_{G_L})(\omega_{G_0} \omega_{G_L} + \omega_{P_0} \omega_{P_L})(\omega_{P_0}^2 - \omega_{P_0} \omega_{P_L})(\omega_{P_L}^2 - \omega_{P_0} \omega_{P_L})}{(\omega_{P_0} + \omega_{P_L})(\omega_{G_0}^2 - \omega_{P_0} \omega_{P_L})(\omega_{G_L}^2 - \omega_{P_0} \omega_{P_L}) \sqrt{\omega_{P_0} \omega_{P_L}}} \times$$

$$\times \text{sin } \sqrt{\omega_{P_0} \omega_{P_L}} \tau.$$

Следует отметить, что при вычислении передаточных функций по формулам (3) и (4) безразмерное время  $\tau$  не представляет особого интереса, так как нас интересует форма кривых и время проведения эксперимента.

**Численный эксперимент.** Для проведения численного эксперимента выбран результат натурных экспериментов, проведенных на промышленном магистральном газопровode «Компрессор-завод» с целью определения закономерностей изменения параметров газового потока при аварийном режиме в различных условиях эксплуатации [3]. Длина газопровода 18 км, диаметр 400 мм, производительность 1,37 млн м<sup>3</sup>/сут. Авария газопровода имитировалась истечением газа через свечи диаметром 100 мм с пробковыми кранами, которые были установлены в пяти километрах от начала газопровода. Результаты экспериментов, по которым вычислены значения передаточных функций по формулам (4) приведены в таблице. По формулам (5) и (6) вычислены коэффициенты корреляции (так как рас-

Время, с	Давление, МПа	Относительный расход
0	1,38/1,20	1,1/1,0
300	1,28/1,10	1,16/1,1
600	1,20/0,99	1,4/1,3
900	1,15/0,80	1,6/1,42
1200	1,10/0,78	1,7/1,6
1500	0,91/0,77	1,9/1,7
1800	0,90/0,76	2,0/1,75
2100	0,90/0,74	1,8/1,7
2400	0,90/0,72	1,5/1,4
2700	0,90/0,70	1,3/1,2
3000	0,90/0,70	1,2/1,1
3300	0,90/0,70	1,1/1,0

считывались дискретные данные), которые для каждой передаточной функции оказались приблизительно равными. В первом случае значения коэффициента корреляции равны 0,83 и 0,65, во втором — 0,76 и -0,83 для  $K_1(t)$  и  $K_2(t)$  соответственно, что свидетельствует о ненормальном функционировании газопровода.

**Выводы**

1. Предложено методика диагностирования газодинамического состояния трубопроводной системы транспортировки газа на основе линейной модели движения газа в трубах.
2. Даны аналитические формулы критериев диагностирования на основе взаимно-корреляционных функций интегралов передаточных функций.
3. Проведен численный анализ на основе эксплуатационных данных при нормальном функционировании системы. Для искусственно имитированных аварийных ситуаций проверена чувствительность разработанных моделей.

1. *Rustamov K. A., Agayev N. B.* Deterministic-Statistic methods for diagnosing a state of gas transportation systems. — Third Baku International Congress on energy, ecology, economy. — Baku, 1995. — P. 54.
2. *Рустамов К. Э., Агаев Н. Б., Абдуллаев Н. М., Гулиев О. Ф.* Системный подход к решению задач диагностирования состояний трубопроводных систем. — Изв. НАН Азербайджана. Науки о земле. — Баку. — 2000. — № 2. — С. 164–168.
3. *Рустамов К. Э., Абдуллаев М. Н., Агаев Н. Б., Алиев И. К.* Об одной методике моделирования физических процессов неустановившегося течения газа в сложных газотранспортных системах. — Деп. в АзНИИНТИ, № 1814-Аз 25.04.1992. ДНР №9.

Азербайджан. архитектур.-строит. ун-т, Баку

Поступила в редакцию 25.01.2003