

## **О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГАЗОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ИХ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ**

Джафаров Т.В.

*Производственное объединение «Азеригазнегл», Азербайджан, г.Баку*

*Задача обеспечения высокого уровня надёжности и эффективности функционирования газопроводов является комплексной проблемой. Одной из основных причин ухудшения работоспособности газопровода является его закупорка (частичная или полная). Для разработки оперативных методов обнаружения закупорки и принятия своевременных инженерных решений обеспечивающих нормальный режим функционирования газопровода, представляется актуальным вопрос диагностики внутренней поверхности газопровода.*

*Для исследования влияния зоны закупорки на стационарную характеристику газового потока была собрана экспериментальная установка. Были рассмотрены различные объёмы закупорки газопровода. На основе исследований предложена для практических расчётов методика определения места закупорки газопровода.*

*Ключевые слова: система газоснабжения, повышение надёжности, анализ состояния, зона образования гидратов*

Развитие газовой промышленности сопровождается сооружением и эксплуатацией сложных газотранспортных магистралей. В настоящее время общая протяженность магистральных газопроводов в Азербайджане превышает 4000 км. Общее физическое старения сети магистральных газопроводов требует выработки единой технической основы по предотвращению аварий, обеспечению безопасной эксплуатации, основанной на фактическом техническом состоянии. Анализ трубопроводной системы показывает, что надёжность ее функционирования зависит от совершенствования системы ее эксплуатации и ремонта.

Задача обеспечения высокого уровня надёжности и эффективности функционирования магистральных газопроводов является комплексной проблемой. Её успешное решение закладывается на этапах проектирования и сооружения, осуществляется на этапе эксплуатации посредством организации рациональной системы технического обслуживания и выявления нарушений нормальных режимов функционирования.

Газопроводные системы являются сложными динамическими системами и состоят из большого числа взаимосвязанных агрегатов и элементов, в них проте-

кают различные технологические процессы. Современные газопроводные системы эксплуатируются в сложных условиях: в широком диапазоне температур, в районах пониженного давления, под воздействием коррозионно-опасных грунтов, вибраций с большой амплитудой и широким спектром частоты и т.д., что существенно влияет на работоспособность системы. Одной из основных причин ухудшения работоспособности газопровода является его закупорка (частичная или полная), связанная с загрязнением трубопровода различными включениями.

Достаточно эффективных дистанционных методов определения места закупорки пока не существует. В работе [1] была предпринята попытка определить место закупорки газопровода при стационарном режиме. Однако из полученного в [1] уравнения достаточно сложно определить местоположение закупорки, т.к. в это уравнение входит неизвестная величина  $Dp$  - перепад давления в точке закупорки.

В связи с этим представляется актуальным диагностика внутренней поверхности газопровода, связанная с обнаружением закупорки в нём с целью принятия своевременных инженерных решений обеспечивающих нормальный режим функционирования газопровода и повышение производительности. С этой целью ставится задача определения места закупорки газопровода при различных величинах его засорения при стационарном режиме течения газа. Для успешного решения задачи диагностики состояния внутренней поверхности газопровода необходимо правильно выбрать показатель, который характеризует его, и, следовательно, эффективность газопередачи и разработать достаточно точный и оперативный метод оценки этого показателя по эксплуатационным изменениям режима работы газопровода. Известно, что в качестве показателя состояния газопровода часто используется коэффициент гидравлического сопротивления, который далеко не полностью характеризует состояние внутренней поверхности газопровода, в связи с чем в последнее время используют другой показатель – коэффициент линейаризации, усреднённый по времени и координате:

$$K = \left( \frac{\lambda \omega}{2 D} \right) \quad (1)$$

где  $\lambda$  - коэффициент гидравлического сопротивления,  $\omega$  - скорость течения газа по трубопроводу,  $D$  – внутренний диаметр трубопровода. Вышеуказанный

показатель обладает недостатком – он зависит от режима газопередачи (т.е. от средней скорости движения газа), который может нивелировать изменения данного коэффициента. В то же время данный показатель более полно характеризует состояние внутренней поверхности газопровода, т.к. включает в себя значения внутреннего диаметра газопровода, изменяющегося в процессе эксплуатации. Исходя из вышесказанного, в настоящее время применяют другой коэффициент вида [2]:

$$K_1 = \left( \frac{2 \lambda}{\pi D^3} \right)_{cp.} = \frac{K}{c^2} - \frac{\bar{P}}{Q} \quad (2)$$

где  $c$  – скорость воздуха в движущемся газе ( $c = 310$  м/с),  $\bar{P}$  – среднее давление в трубопроводе, определяющееся по формуле:

$$\bar{P} = \frac{2}{3} \left[ \bar{P}_1 + \left( \frac{\bar{P}_2^2}{\bar{P}_1 + \bar{P}_2} \right) \right] \quad (3)$$

где  $\bar{P}_1$  и  $\bar{P}_2$  – соответственно давления на входе и выходе из трубопровода,  $Q$  – средний расход газа в трубопроводе рассчитанный по экспериментальным данным.

Рассмотрим линеаризованную систему неустановившегося движения газа по трубопроводу, преобразованную по Лапласу:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp}{dx} &= - \left( \frac{k}{F} \right) M \\ \frac{dM}{dX} &= \left( \frac{-S}{c^2} \right) P \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где  $M$  – массовый расход газа,  $X$  – текущая координата движения газа,  $F$  – площадь поперечного сечения трубопровода,  $S$  – параметр Лапласа. На основе данной системы уравнений разработана математическая модель засорённого участка газопровода [1], описываемая следующим образом:

$$\Delta P = P_1 - P_2 - M_0 \frac{L}{F} \frac{k_2}{F} \left[ 1 - \frac{X_l}{L} \left( 1 - \frac{1}{\gamma^2} \right) \right], \quad (5)$$

где  $\Delta P$  – скачок давления в газопроводе в месте закупорки,  $P_1$  и  $P_2$  – соответственно давление в начале и конце газопровода,  $M_0$  – массовый расход,  $L$  – длина газопровода,  $X_l$  – искомая точка закупорки в газопроводе.

$$K_2 = \left( \frac{\pi}{2L} \right)^2 / \frac{C^2}{K}, \quad (6)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}}. \quad (7)$$

Преобразуем уравнение (5) в виде линейного уравнения, следующим образом:

$$Y = Ax + b, \quad (8)$$

где  $b = \Delta P$ ,  $Y = P_1 - P_2$ .

Тогда (5) примет вид:

$$P_1 - P_2 = \Delta P + M_0 \frac{L k_2}{F} \left[ 1 - \frac{X_1}{L} \left( 1 - \frac{1}{\gamma^2} \right) \right] \quad (9)$$

Искомое значение места закупорки  $X_1$  находится из соотношения:

$$A = \frac{L k_2}{F} \left[ 1 - \frac{X_1}{L} \left( 1 - \frac{1}{\gamma^2} \right) \right] \quad (10)$$

Строятся графики зависимости  $P_1 - P_2$  от  $M_0$  и по построенному графику происходит поиск  $A$ . Коэффициент  $A$  также можно найти методом наименьших квадратов, используя для этого статистику, полученную из экспериментальных данных.

Для исследования влияния зоны закупорки на стационарную характеристику газового потока была собрана экспериментальная установка. Установка состояла из поршневого компрессора, ресивера, редуктора, установленного в начале трубопровода ( $L = 15$  м). Для измерения перепада давления были установлены образцовые манометры, для измерения расхода газа сепаратор и газовый счетчик, а для имитации уменьшения поперечного сечения трубопровода установлен вентиль.

В качестве испытуемого газа был использован природный газ. Эксперименты проводились при температуре  $t = 20$  °С. Обеспечение стабильного расхода газа (стационарного режима) осуществлялось с помощью редуктора. Для каждого установленного расхода газа, производились измерения перепадов давления в зависимости от изменения сечения закупорки. Это позволяет оценить влияние расхода на перепад давления. На рассматриваемой модели место имитируемой закупорки находилось на расстоянии 0,5 м от начала газопровода. Давление  $P_1$  и  $P_2$  замерялись манометрами, установленными в начале и конце газопровода. Задача заключалась в нахождении места закупорки в газопроводе ( $X_1$ ) вышеописанным способом и сравнении его с искусственно созданной точкой закупорки. В случае

получения приемлемых результатов можно будет считать предлагаемую методику определения места закупорки газопровода допустимой в практических расчётах. Были рассмотрены различные объёмы закупорки сечения газопровода: чистый газопровод, газопровод с закупоркой 20, 40, 60, 80 %. Полученные в процессе эксперимента результаты сведены в таблицы 1-5, а графики зависимости перепада давления от расхода показаны на рисунках 1 – 4.

Таблица 1

Зависимость перепада давления газа в модели газопровода  
от расхода в нём при закупорке

$P_1$ , МПа	$P_2$ , МПа	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	$\Delta P$ , МПа
закупорка 20 %			
0.0648	0.0592	0.001150	0.0056
0.0648	0.0576	0.001330	0.0076
0.0608	0.0544	0.001120	0.0064
0.0567	0.0496	0.001050	0.0061
0.0480	0.0432	0.000967	0.0048
0.0432	0.0384	0.000900	0.0048
0.0384	0.0336	0.000833	0.0048
закупорка 40 %			
0.0656	0.0576	0.001150	0.0080
0.0696	0.0560	0.001330	0.0136
0.0632	0.0536	0.001120	0.0096
0.0568	0.0488	0.001050	0.0080
0.0492	0.0416	0.000967	0.0076
0.0456	0.0368	0.000900	0.0088
0.0400	0.0312	0.000833	0.0088
закупорка 60 %			
0.0720	0.0568	0.001150	0.0152
0.0778	0.0536	0.001330	0.0192
0.0696	0.0520	0.001083	0.0176
0.0608	0.0448	0.000980	0.0160
0.0528	0.0384	0.000900	0.0144
0.0480	0.0336	0.000817	0.0144
0.0440	0.0260	0.000730	0.0180
закупорка 80 %			
0.0776	0.0560	0.001100	0.0216
0.0800	0.0512	0.001067	0.0288
0.0792	0.0472	0.001016	0.0320
0.0648	0.0400	0.000933	0.0248
0.0576	0.0336	0.000817	0.0240
0.0536	0.0280	0.000717	0.0256
0.0496	0.0192	0.000567	0.0300

Таблица 2

Определение месторасположения закупорки участка в модели газопровода при величине закупорки 20 %

Расход газа $Q$ , м <sup>3</sup> /с	Давление в начале $P_1$ , МПа	Давление в конце $P_2$ , МПа	Относительная погрешность отклонения найденной закупорки от имитированной, в %
0.001500	0.0648	0.0592	8,6
0.001330	0.0648	0.0576	8,6
0.001120	0.0608	0.0544	8,6
0.001050	0.0557	0.0496	8,5
0.000967	0.0480	0.0437	8,4
0.000900	0.0432	0.0384	8,3
0.000833	0.0040	0.0312	8,1

Таблица 3

Определение месторасположения закупорки участка в модели газопровода при величине закупорки 40 %

Расход газа $Q$ , м <sup>3</sup> /с	Давление в начале $P_1$ , МПа	Давление в конце $P_2$ , МПа	Относительная погрешность отклонения найденной закупорки от имитированной, в %
0.001500	0.0656	0.0576	1.4
0.001330	0.0596	0.0560	0.2
0.001120	0.0632	0.0536	1.4
0.001050	0.0568	0.0488	0,6
0.000967	0.0492	0.0416	1,4
0.000900	0.0456	0.0368	2,1
0.000833	0.0040	0.0312	2,9

Таблица 4

Определение месторасположения закупорки участка в модели газопровода при величине закупорки 60 %

Расход газа $Q$ , м <sup>3</sup> /с	Давление в начале $P_1$ , МПа	Давление в конце $P_2$ , МПа	Относительная погрешность отклонения найденной закупорки от имитированной, в %
0.001500	0.0720	0.0568	3,3
0.001330	0.0728	0.0536	3,2
0.001083	0.0696	0.0520	2,9
0.000980	0.0608	0.0448	2,3
0.000900	0.0528	0.0384	1,6
0.000817	0.0480	0.0336	1,0
0.000733	0.0440	0.0264	0,8

Таблица 5

Определение месторасположения закупорки участка в модели газопровода при величине закупорки 80 %

Расход газа $Q$ , м <sup>3</sup> /с	Давление в начале $P_1$ , МПа	Давление в конце $P_2$ , МПа	Относительная погрешность отклонения найденной закупорки от имитированной, в %
0.001100	0.0776	0.0556	1,3
0.001067	0.0800	0.0512	1,6
0.001016	0.0792	0.0572	1,3
0.000933	0.0648	0.0400	7,0
0.000817	0.0576	0.0336	3,8
0.000717	0.0536	0.0280	2,8
0.000567	0.0496	0.0192	7,6

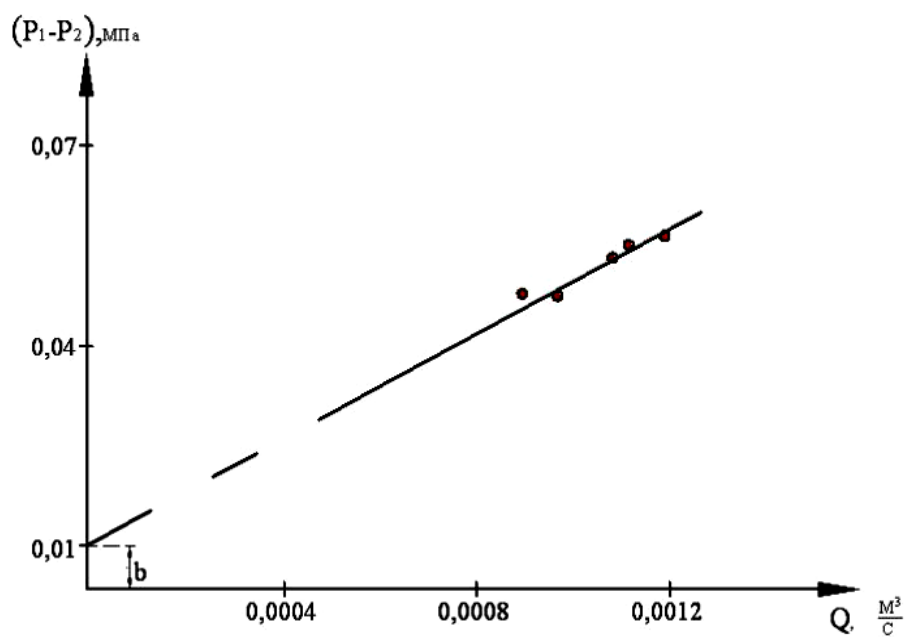


Рисунок 1. График зависимости перепадов давления от расхода при величине закупорки 20 %

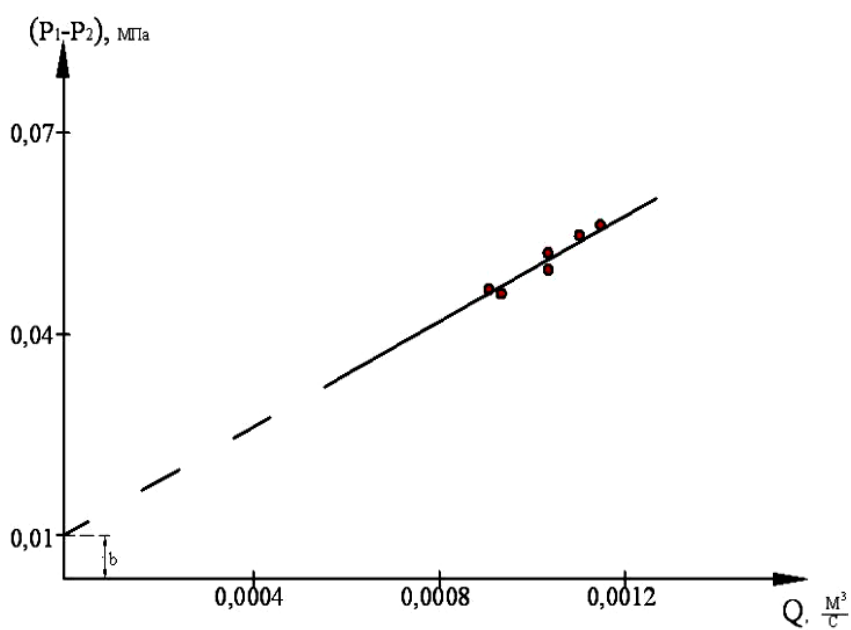


Рисунок 2. График зависимости перепадов давления от расхода при величине закупорки 40 %

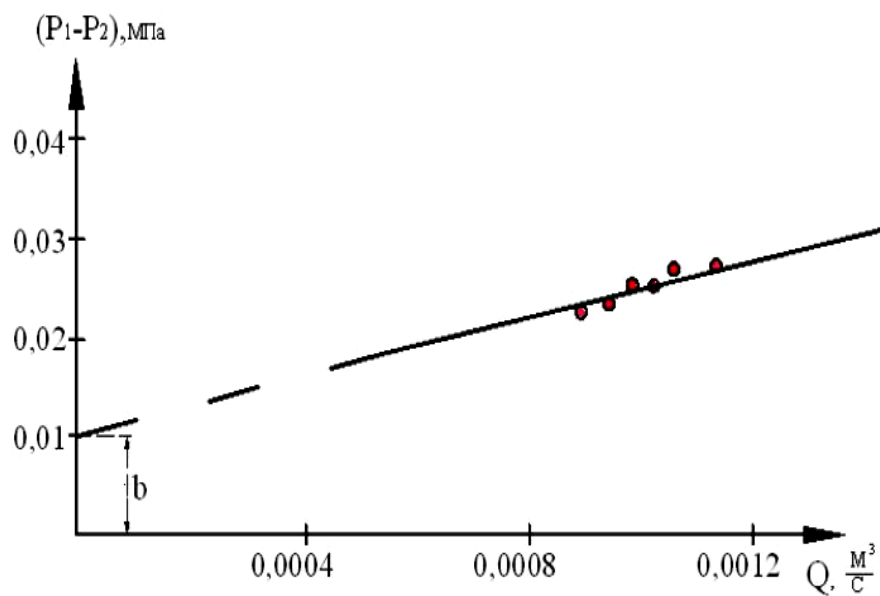


Рисунок 3. График зависимости перепадов давления от расхода при величине закупорки 60 %

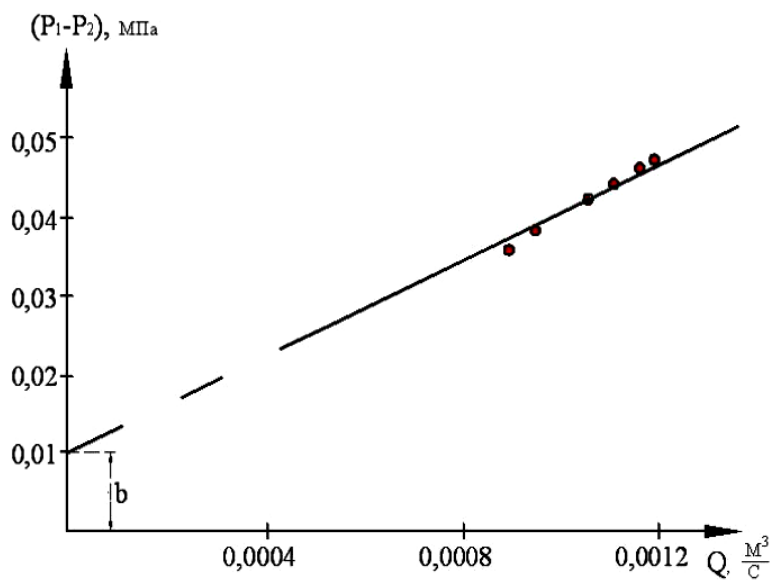


Рисунок 4. График зависимости перепадов давления от расхода при величине закупорки 80 %

Все расчёты были проведены по модели засоренного участка [1]. Согласно результатам эксперимента относительная погрешность отклонения найденных месторасположений закупорок от имитированных в среднем не превышает 2-3 % при величине закупорки более 20 %.

Таким образом, были получены приемлемые результаты, позволяющие использовать предлагаемую методику в практических расчётах для определения места закупорки при стационарном режиме течения газа.

Закупорки газопровода приводят к нарушению нормального режима работы газопровода и снижению его пропускной способности, а также ухудшают динамическую характеристику газоперекачивающих агрегатов.

С целью изучения характера изменения давления расхода газа при закупорке во время функционирования магистральных газопроводов были проведены исследования в производственных условиях на действующем газопроводе. В исследовании закупорка имитировалась шаровым краном, который был установлен в 6 км от начала газопровода.

Из анализа полученных результатов следует, что изменение давление газа в начале, в конце, справа и слева от места закупорки подчиняется линейному закону:  $P(x, t) = P_n + at$ . Также из анализа полученных результатов следует, что при образовании частичной закупорки в конце газопровода падение давления наблюдается в первые 5 мин, а затем скорость снижения давления стабилизируются, и в газопроводе устанавливается новый стационарный режим. За период проведения исследования производительность газопровода снизилась на 22.5 %, а гидравлическое сопротивление газопровода увеличилась в 1.24 раза. Динамика изменения давления и расхода газа в начале и конце участка трубопровода при его полной и частичной закупорке приведена в таблице 6 и 7.

Повышение и снижение расхода газа в газопроводе при образовании частичной закупорки в отличии от полной закупорки, происходит с некоторым запаздыванием. Реакция динамической характеристики в основном зависит от степени частичной закупорки, а также от места ее расположения. Переходные процессы в газопроводе при его полной и частичной закупорке характеризуется степенью закупорки. Поэтому, при изучении характера изменения параметров газопровода

при образовании закупорок необходимо сопоставлять данные об изменении давления и расхода газа с параметрами нового режима работы газопровода.

Таблица 1.6

Динамика изменения давления и расхода газа в начале и конце участка газопровода при полной закупорки

Время, мин.	Давление, МПа		Расход газа в безразмерных величинах	
	В начале	В конце	В начале	В конце
0	2,0	1,82	1,00	1,00
5	2,2	1,74	0,90	1,30
10	2,3	1,63	0,80	1,65
15	2,4	1,60	0,72	1,77
20	2,5	1,50	0,70	2,10
25	2,7	1,30	0,60	2,40
30	2,9	1,08	0,80	2,30
35	3,0	1,25	0,90	0,70

Таблица 7

Динамика изменения давления и расхода газа при образовании частичной закупорки в газопровода

Время, минуты	Давление, МПа		Расход газа в безразмерных величинах	
	В начале газопровода	В конце газопровода	В начале газопровода	В конце газопровода
0	2,42	1,65	1,00	1,00
5	2,40	1,50	1,00	1,00
10	2,30	1,50	0,90	1,10
15	2,40	1,50	0,87	1,10
20	2,50	1,50	0,80	1,10
25	2,60	1,48	0,80	1,10
30	2,70	1,48	0,80	1,10
35	2,70	1,48	0,80	1,10

### Литература

1. Ионин Д. А., Яковлев Е. И. Современные методы диагностики магистральных газопроводов. Л.: Недра, 1987. 232с.
2. Ионин Д. А., Яковлев Е. И. Комплекс алгоритмов и программ контроля и диагностики технического состояния магистральных газопроводов / Госфонд алгоритмов и программ. ППО 4115, 1980. 112с.