

УДК 622.691

## ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЕ МОДЕЛИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ПРИ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЯХ

*Ходжаев Ш. Т., Ганиева Н. А., Ходжаев Т. Т., Гостев Н. В.*

khodzhaev\_shuhrat@mail.ru; nily-85@inbox.uz; tthod@mail.ru;

aeroport100@mail.ru

Самаркандский филиал Ташкентского Университета Информационных Технологий имени  
Мухаммада ал-Хоразмий, г. Самарканд, ул. Ш. Мирзо, 37-А

Ставится и решается задача формализации и оценки причинно-следственной модели принятия экспертных решений для анализа показателей функционирования газораспределительной сети при нештатных ситуациях. Информационные особенности и технические характеристики систем газоснабжения определяют первоочередные требования, которые нацелены на проведение и оценку качественной идентификации их технико-технологических показателей, определяющих условия по обеспечению бесперебойной подачи газа потребителям, безопасности эксплуатации, простоте и удобности их обслуживания. Результаты вычислительных экспериментов определяют варианты принятия эффективных решений по части регулирования потоков распределения газа в сети.

**Ключевые слова:** газораспределительная сеть, информационное обеспечение, газодинамический расчет, нештатная ситуация, экспертное решение, управление, функция Лагранжа.

**Цитирование:** *Ходжаев Ш. Т., Ганиева Н. А., Ходжаев Т. Т., Гостев Н. В.* Причинно-следственные модели показателей функционирования газораспределительной сети при нештатных ситуациях // Проблемы вычислительной и прикладной математики. — 2018. — № 4(16). — С. 74–81.

### 1 Введение

Газоснабжающие сети, представляющие собой сложную техническую систему управления, зачастую подвергаются воздействию неконтролируемых случайных возмущений, определение и оценка которых обусловлена как временными затратами, так и другими видами ресурсов.

Информационные особенности характеристик сложных технических систем управления [1], и, в частности систем газоснабжения, определяют первоочередные требования, которые состоят в качественной идентификации их показателей по обеспечению бесперебойной подачи газа потребителям, в безопасности эксплуатации, простоте и удобности их обслуживания. Кроме того, эта система должна предусматривать возможность отключения отдельных элементов или участков газоснабжающей сети для производства ремонтных и аварийных работ. При этом качественная оценка сложившейся ситуации требует проведения активного вычислительного эксперимента на базе формализации имитационной причинно-следственной модели, что определяет характер концептуальных особенностей, позволяющих установить функционирование рассматриваемой сети при нештатных ситуациях.

Формирование и формализация ситуационной причинно-следственной модели являются, в данном случае, приоритетными задачами идентификации показателей функционирования газораспределительной сети.

Отметим, что возрастающая потребность в газе и требования, предъявляемые к его кондиции пользователями, приводят к необходимости рационального разрешения таких существенных вопросов, как выбор, обоснование или уточнение объема потокораспределения целевого продукта по объектам на всех уровнях его иерархии.

Структурно-функциональные свойства исследуемой задачи обусловлены характером ее экстремальности, которые предъявляют требования к оценке дисциплинирующих условий (ограничений), качественно влияющих на ее решение. При решении подобных задач широко используются и численные методы.

Однако, как отмечено в [2], до сих пор нет удовлетворительных тестов, позволяющих проверить, оптимально ли конкретное решение рассматриваемой экстремальной задачи (при допустимых ограничениях), и поэтому нет общих методов их решения.

Разрабатываемые алгоритмы позволяют лишь строить последовательности, предельные элементы которых удовлетворяют частным условиям оптимальности при нештатных ситуациях.

Как правило, в задачах оптимизации для точек, удовлетворяющих всем ограничениям, вводится термин «допустимое» решение, что обуславливает процесс ситуационной экспертной оценки функционирования исследуемой газораспределительной сети. Затем на множестве допустимых решений отыскивается минимум (максимум) целевой функции [3].

Для формализации модели задачи в работе рассматривается метод неопределенных множителей Лагранжа [4].

Применительно к исследуемой задаче функция цели обусловлена минимизацией потерь количества газа при нештатных ситуациях.

Функцией Лагранжа для этой задачи будет

$$\Phi(q_{11}, q_{12}, \dots, q_{ij}, \lambda_i) = \sum_{j=1}^x \varphi_{ij}(q_{ij}) + \lambda_i \left( \bar{Q} - \sum_{j=1}^k q_{ij} \right).$$

Здесь  $q_{11}, q_{12}, \dots, q_{ij}$  – количество газа на соответствующих участках сети;  $\varphi_{ij}$  – потери газа на участках сети.

Чтобы целевая функция при данных ограничениях в некоторой точке имела экстремум, необходимо выполнение в этой точке следующих условий:

$$\frac{\partial \varphi_{ij}}{\partial q_{ij}} + \lambda = 0, \quad \bar{Q} - \sum_{j=1}^k q_{ij} = 0; \quad i = 1, m; \quad j = 1, k.$$

Задачу в такой формализации можно отнести к классу некорректных, так как на заданном множестве данных она может иметь более одного решения или же вообще не иметь решения.

В [5] исследована и формализована математическая модель решения задачи оптимального распределения плановой добычи газа по уровням иерархии газодобывающего объединения. Концепции формализации этой модели послужили базовой основой для построения математической модели рассматриваемой задачи.

Согласно [3], решение всякой количественной задачи обычно заключается в нахождении «решения»  $U$  (в нашем примере – это плановое количество газа  $Q$ ) по заданным «исходным данным»  $z$  (для примера,  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  – количество поступающего газа на участки). Будем считать их элементами метрических пространств  $U$  и  $F$  с расстояниями между элементами  $\rho_u(u_1, u_2), \rho_f(z_1, z_2); u_1, u_2 \in U; z_1, z_2 \in F$ .

Далее, согласно [3–5], определяется следующее. Пусть определено понятие «решения» и каждому элементу  $u \in U$  отвечает единственное решение  $Az = u$  из пространства  $F$ . Задача определения решения уравнения  $Az = u$  называется устойчивой на пространствах  $(F, U)$ , если для любого  $\varepsilon > 0$  можно указать такое число  $\delta(\varepsilon) > 0$ , что из неравенства

$$\rho_F(z_1, z_2) \leq \delta(\varepsilon)$$

следует

$$\rho_U(u_1, u_2) \leq \varepsilon,$$

где  $u_1 = Az_1$ ;  $u_2 = Az_2$ ;  $u_1, u_2 \in U$ ;  $z_1, z_2 \in F$ .

Задача определения  $z$  из пространства  $F$ , по «исходным данным»  $u$  из пространства  $U$ , называется корректно поставленной на паре метрических пространств  $(F, U)$  [4], если выполняются следующие требования:

- для всякого элемента  $u \in U$  существует решение  $z$  из пространства  $F$ ;
- решение определяется однозначно;
- задача устойчива на пространствах  $(F, U)$ .

Корректная постановка задачи часто трактовалась как условие, которому должна удовлетворять всякая математическая задача, соответствующая какой-либо физической или технической задаче.

Однако, как отмечено в [3, 4], это поставило под сомнение целесообразность изучения некорректно поставленных задач, и такая точка зрения, совершенно естественная в применении к некоторым явлениям, развивавшимся во времени, не может быть перенесена на все задачи.

В некоторых случаях при решении практических задач на заданном множестве «исходных данных» может и не существовать решения уравнения  $Az = u$ .

В связи с этим в [3] было введено понятие квазирешения этого уравнения, т.е. обобщение понятия решения уравнения  $Az = u$ .

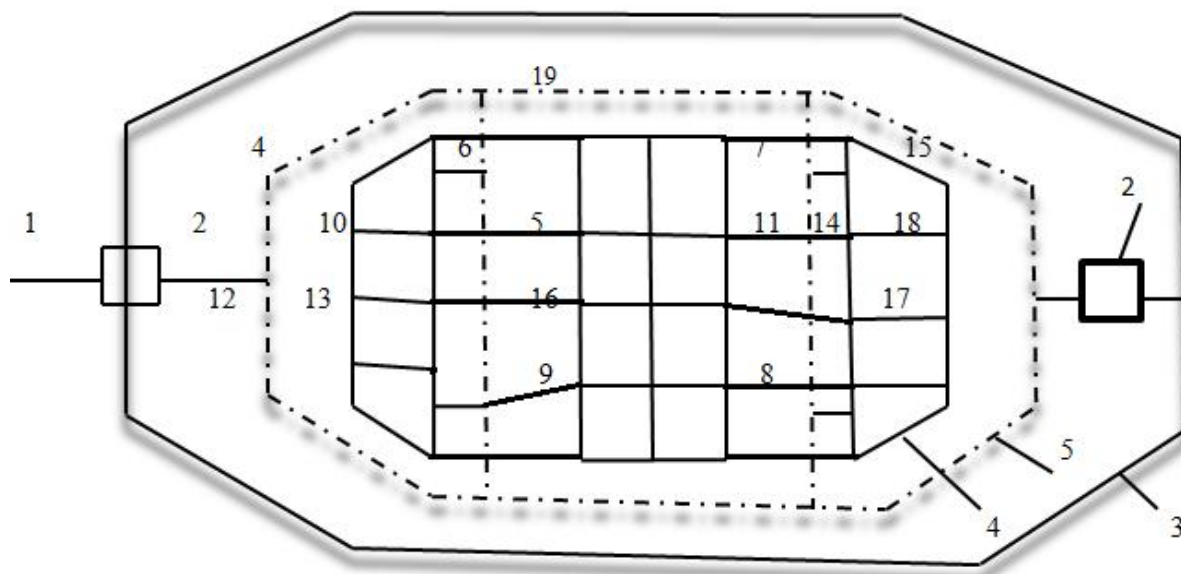
## 2 Основная часть

Концептуальные особенности управления газоснабжающими сетями, в определенных временных интервалах функционирования, позволяют отнести их как к линейным динамическим объектам (дискретность данных), так и к нелинейным динамическим объектам (в плане некорректно поставленных задач). Для идентификации показателей функционирования рассматриваемой газоснабжающей сети в работе применен метод многошаговой вероятностной оценки [5]. Следует отметить, что нештатные ситуации (аварийные режимы работы газоснабжающей сети) наступают тогда, когда возникают «отказы» в работе некоторых участков сети, примыкающих к точке питания. В нашем примере – это экспериментальные участки «3» и «6» закольцованной газоснабжающей сети, указанные на рис. 1.

Отметим, что доставка потребителям целевого продукта в аварийных режимах должна осуществляться по сети с условием обязательного поддержания давления газа у последнего потребителя. При этом расход газа на участках определяется по формуле [2]:

$$V_P = 0,59 \sum (K_{об.i} V_i),$$

где  $K_{об.i}$  – коэффициент обеспеченности различных потребителей газа; в нашем расчете этот коэффициент принят постоянным и равным 0,8 у всех потребителей газа;



**Рис. 1** Закольцованная система газоснабжающей сети

$V_i$  – часовой расход газа у соответствующего потребителя,  $\text{м}^3/\text{ч}$ .  
Расчетная длина участков газопровода определяется по формуле

$$l_p = 1,1 l_{\Gamma}.$$

Для начала расчета определяют среднюю удельную разность квадратов давлений:

$$A_{CP} = \frac{P_H^2 - P_K^2}{1,1 \sum l_i}$$

где  $\sum l_i$  – сумма длин всех участков по расчетному направлению, км.

Средняя удельная разность квадратов давлений в первом аварийном режиме составит

$$A_{CP} = \frac{0,7^2 - 0,4^2}{7,86} = 0,042 \text{ МПа}^2,$$

во втором –

$$A_{CP} = \frac{0,49 - 0,16}{7,39} = 0,047 \text{ МПа}^2$$

### 3 Вычислительный эксперимент

Для идентификации и оценки экспериментальных расчетных показателей с реальными производственными данными был проведен их гидравлический анализ в аварийных режимах работы сети.

*Гидравлический расчет газоснабжающей сети.* Алгоритм гидравлического расчета обусловлен выполнением и учетом следующих действий (характерных для газопроводов низкого и среднего давлений):

– гидравлический расчет газоснабжающей сети при известном значении расчетной потери давления газа между ее участками. При этом расчетные потери давления следует принимать в пределах давления, принятого для газопроводов среднего и высокого давлений;

– учет расчётных потерь давления газа в распределительных газопроводах низкого давления (не более 18 кПа);

– значения расчетной потери давления газа при проектировании газоснабжающих сетей всех давлений для промышленных, сельскохозяйственных и бытовых предприятий, а также учреждений коммунального хозяйства принимаются в зависимости от давления газа в месте их подключения;

– падение давления в газоснабжающей сети низкого давления следует определять в зависимости от режима движения газа по газопроводу, характеризуемого числом Рейнольдса:

$$Re = 0,0354 \frac{Q}{dv},$$

где  $Q$  – расход газа, м<sup>3</sup>/ч при температуре 0 и давлении 0,10132 МПа (760 мм. рт. ст.);

$d$  – внутренний диаметр газопровода, см;

$v$  – коэффициент кинематической вязкости газа, м<sup>2</sup>/с (при температуре 0 и давлении 0,10132 МПа).

В зависимости от значения  $Re$  падение давления в газопроводах определяется по следующим формулам:

для ламинарного режима движения газа при  $Re \leq 2000$

$$H = 1,132 \cdot 10^6 \frac{Q}{d^4} v \rho l,$$

для критического режима движения газа при  $Re = 2000 - 4000$

$$H = 0,516 \frac{Q^{2,333}}{d^{5,333} v^{0,333}} \rho l,$$

для турбулентного режима движения газа при  $Re > 4000$

$$H = 69 \left( \frac{n}{d} + 1922 \frac{vd}{Q} \right)^{0,25} \frac{Q^2}{d^5} \rho l,$$

где  $H$  – падение давления, Па;

$\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>, при температуре 0 и давлении 0,10132 МПа;

$l$  – расчетная длина газопровода постоянного диаметра, м;

$n$  – эквивалентная абсолютная шероховатость внутренней поверхности стенки трубы принимается равной, см: для стальных труб – 0,01; для полиэтиленовых труб – 0,002;

– расчетный расход газа на участках распределительных наружных газопроводов низкого давления, имеющих путевые расходы газа, следует определять как сумму транзитного и 0,5 путевого расходов газа на данном участке.

Далее, в работе осуществляется гидравлический расчет газопроводов среднего и высокого давления.

Расчет производим по всей области турбулентного режима движения газа по формулам:

$$\frac{P_1^2 - P_2^2}{l} = 1,4 \cdot 10^{-5} \left( \frac{n}{d} + 1922 \frac{vd}{Q} \right)^{0,25} \frac{Q^2}{d^5} \rho,$$

где  $P_1$  – абсолютное значение газа в начале газопровода, МПа;  $P_2$  – то же, в конце газопровода, МПа.

Результаты расчетов вычислительного эксперимента, связанного с функционированием газоснабжающей сети при нештатных ситуациях, приведены в таблице.

Правильность расчетов проверяется путем вычисления конечного давления по выражению

$$P_K = \sqrt{P_H^2 - \sum (P_H^2 - P_K^2)} - 0,1, \quad (1)$$

где  $\sum (P_H^2 - P_K^2)$  – сумма разностей квадратов давлений на участках.

Значение  $P_K$ , полученное по (1), не должно более чем на 5% отличаться от заданного избыточного давления  $P_K$ . Например, при «отказе» участка 3

$$= \sqrt{0,49 - 0,3322} - 0,1 = 0,297 \text{ МПа};$$

здесь отклонение составляет 1%.

При «отказе» участка 6

$$P_K = \sqrt{0,49 - 0,3253} - 0,1 = 0,306 \text{ МПа};$$

здесь отклонение составляет 2%.

#### Результаты гидравлического расчета в аварийных режимах

№ участка	Отказал участок 3					Отказал участок 6			
	$d_y$ , мм	$l_p$ , км	$V_p$ , м <sup>3</sup> /ч	$(p_n^2 - p_k^2)$ / $l_p$	$p_n^2 - p_k^2$ , МПа <sup>2</sup>	№ участка	$d_y$ , мм	$l_p$ , км	$V_p$ , м <sup>3</sup> /ч
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4
19	600	0,594	11384,6	0,021	0,0125	1	600	0,077	11384,6
18	600	0,616	11383,8	0,021	0,0129	2	600	0,429	11342,2
17	600	0,154	11368,6	0,021	0,0032	3	500	0,759	9953,9
16	600	0,275	11340,6	0,021	0,0058	4	500	0,187	9953,1
15	600	1,221	11304,9	0,021	0,0256	5	500	0,44	9596,9
14	600	0,11	11269,2	0,021	0,0023	6	200	0,792	660,6
13	500	0,924	11226,8	0,06	0,0554	7	200	0,198	618,2
12	500	0,341	11225,9	0,06	0,0205	8	200	0,561	582,5
11	500	0,055	11190,2	0,06	0,0033	9	150	0,44	551,3
10	500	0,55	10834,1	0,054	0,0297	10	150	0,55	550,5
9	500	0,44	10833,3	0,054	0,0238	11	125	0,055	194,3
8	500	0,561	10802,1	0,054	0,0303	12	125	0,341	158,6
7	500	0,198	10766,4	0,054	0,0107	13	125	0,924	157,8
6	500	0,792	10724,0	0,054	0,0428	14	100	0,11	115,4
5	125	0,44	1787,6	0,034	0,015	15	100	1,221	79,7
4	125	0,187	1431,5	0,027	0,005	16	100	0,275	43,9
3	125	0,759	1430,7	0,027	0,0205	17	100	0,154	16,0
2	100	0,429	42,4	0,03	0,0129	17	100	0,616	0,8
		8,646		Итого		0,3322		8,129	

Следовательно, расчет сделан правильно. Зная потери давления на каждом участке, далее можно определить абсолютное давление газа в каждой точке в обоих аварийных режимах:

$$P_i = \sqrt{P_H^2 - \sum (P_H^2 - P_K^2)_i},$$

где  $\sum (P_H^2 - P_K^2)_i$  – сумма разности квадратов давлений на участках, предшествующих точке определения давления.

Справка

	$L^*$	$(P_n^2 - P_k^2)/L$	Код*	$Q_i^*$	$P_n^2 - P_k^2$	$P_i$	$(P_n^2 - P_k^2)/Q_i$
1	0,3333333333	8,1818181818	0,8	4684	2,9999999999	5,97215762238	0,00064047821
2	0,2466666666	6,0545454545	0,8	2024	1,6428	5,97940911239	0,00081166008
3	0,0866666666	2,1272727272	0,8	3363	0,2028	5,99277342582	6,03033004153
4	0,0466666666	1,1454545454	0,8	814	0,0588000000	5,99610985000	7,22358745406
5	0,2466666666	6,0545454545	0,8	941	1,6428	5,97940911239	0,00174580235
6	0,08	1,9636363636	0,8	4124	0,1728	5,99332962550	4,19010684709
7	0,0066666666	0,1636363636	0,8	4212	0,0012	5,99944441872	2,84900295355
8	0,2933333333	7,1999999999	0,8	2659	2,3231999999	5,97550555741	0,00087371194
9	0,0933333333	2,2909090909	0,8	4678	0,2352	5,99221717452	5,02778966620

Начальное давление \*

Конечное давление \*

Количество участков \*

Проверка аварийных участков

Результаты расчетов:

Расчетный расход газа, м<sup>3</sup>/ч:

Увязочный круговой расход м<sup>3</sup>/ч:

Падение квадрата давления:

Длина всех участков:

Конечное давление:

Отклонение конечного давления:

Очистить

Выход

Расчет

Рис. 2 Результаты гидравлического расчета газоснабжающей сети при аварийных режимах

Результаты вычислительного эксперимента аварийного режима работы сети представлены в интерфейсе программы (рис. 2).

## 4 Заключение

В результате исследования и оценки сформированной ситуационной причинно-следственной модели показателей функционирования газораспределительной сети:

- сформирован алгоритм гидравлического расчета для симметричной схемы системы газоснабжения;
- разработана программа автоматизации расчета оценки показателей функционирования газораспределительной сети при проявлении нештатных ситуаций;
- проведены машинные эксперименты гидравлического расчета функционирования газораспределительной сети в аварийных режимах.

Вычислительные эксперименты проводились как на базе реальных производственных данных, так и по лабораторным данным. Полученные результаты расчетов имеют практическую согласованность.

Разработанная программа автоматизации расчета апробирована на реальных производственных данных организации «Самаркандрайгаз».

## Литература

- [1] Дилигенская А. Н. Идентификация объектов управления. Самара. – 2009.
- [2] Мирзаджанзаде А. Х. и др. Методы повышения эффективности процессов добычи и транспорта газа. М.: Недра. – 1979.
- [3] Тихонов А. Н., Арсенин В. Л. Методы решения некорректных задач. М.: Наука. – 1979.
- [4] Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука. – 1977.
- [5] Ходжаев Т. Т., Каримов Ф. Р. Математические модели функционирования систем управления. Самарканд: Зарафшан. – 1993.

Поступила в редакцию 17.06.2018

UDC 622.691

## CAUSE-EFFECT MODELS OF INDICATORS OF GAS DISTRIBUTION NETWORK FUNCTIONS IN SUPERNUMERARY SITUATIONS

*Khodjaev Sh. T., Ganieva N. A., Khodjaev T. T., Gostev N. V.*

khodzhaev\_shuhrat@mail.ru; nily-85@inbox.uz; tthod@mail.ru;  
aeroport100@mail.ru

Samarkand branch of the Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad Al-Khwarizmi, Samarqand city. Sh. Mirzo street, 37-A

The paper posed and solved the problem of formalizing and assessing causal model of decision-making for the expert analysis of indicators of the functioning of the gas distribution network in the emergency situations. Information features and specifications of gas supply systems determine the priority requirements, which are aimed at carrying out the identification and assessment of the quality of their technical and technological parameters predetermining conditions to ensure the uninterrupted supply of gas to consumers, security, simplicity and convenient maintenance. The results of computational experiments determine the options to take effective decisions on the regulation of the gas flow distribution in the network.

**Keywords:** gas distribution network, information technology, gas-dynamic calculation, supernumerary situation, the expert solution, management, the Lagrangian function

**Citation:** Khodjaev Sh. T., Ganieva N. A., Khodjaev T. T., Gostev N. V. 2018. Cause-effect models of indicators of gas distribution network functions in supernumerary situations. *Problems of Computational and Applied Mathematics*. 4(16): 74–81.

## References

- [1] Diligenskaya A. N. 2009. *Identifikatsiya obyektov upravleniya*. [Identification of management objects]. Samara. (In Russian)
- [2] Mirzadjanzadeh A. H. et.al. 1979. *Metody povysheniya effektivnosti protsessov dobychi i transporta gaza*. [Methods for improving the efficiency of gas production and transport processes]. M: Nedra. (In Russian)
- [3] Tikhonov A. N., Arsenin V. L. 1979. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach*. [Methods for solving ill-posed problems]. M: Nauka. (In Russian)
- [4] Moiseyev N. N. 1977. *Matematicheskiye zadachi sistemnogo analiza*. [Mathematical problems of system analysis]. M: Nauka. (In Russian)
- [5] Khodzhaev T. T., Karimov F. R. 1993. *Matematicheskiye modeli funktsionirovaniya sistem upravleniya*. [Mathematical models of the functioning of control systems]. Samarkand: Zarafshan. (In Russian)

*Received June 17, 2018*