

*Falova Ekaterina Sergeevna, postgraduate, e.s.falova@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint Petersburg Mining University,*

*Voronkova Yuliya Alexandrovna, postgraduate, ecology\_tsu\_tula@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University*

#### Reference

1. Annual reports of PJSC "PhosAgro" [Electronic resource], URL: <https://www.phosagro.ru/ori/> (accessed 01.10.2019).
2. Appendix To the annual reports of PJSC "PhosAgro" GRI Tables [Electronic resource], URL: <https://www.phosagro.ru/ori/> (accessed 01.10.2019).
3. Official website of PJSC "PhosAgro" [Electronic resource], URL: <https://www.phosagro.ru/> (accessed 01.10.2019).
4. Samarov L. Yu. Substantiation of the system of indicators for the assessment of industrial injuries in vertically integrated coal companies: abstract. dis. ... Cand. tech. Sciences (date accessed: 01.10.2019).
5. Shogren, J. F. Grocken T. D. Risk and its consequences // Econ and Manag, 1999.37. No. 1. Pp. 45-51.
6. Foster K. J. Cybernetic risk analysis // Risk Anal, 1997.17. No. 2.Pp. 215-225.
7. Karnachev I. P., Koklyanov E. B. Analysis of statistical indicators of safety and labor protection, used in the study of the dynamics of occupational traumatism // Vestnik MGTU.T. 14. No. 4. 2011.Pp. 751-757.

УДК 622.453

## **МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ДЕЙСТВУЮЩИХ ВЫРАБОТКАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ**

О.В. Тайлаков

*Обоснован методологический подход к построению моделей искусственного воздухораспределения в горных выработках угольных шахт на основе их сетевого представления двудольными ориентированными графами. Показано, что распределение воздуха в горных выработках определяется путем поиска замкнутых контуров вентиляционной сети, соответствующих позиционным полупотокам сети Петри, и применением метода последовательных приближений.*

*Ключевые слова: горная выработка, сетевая модель, структурные и поведенческие свойства сетей Петри.*

Основополагающее значение для обеспечения эффективного удаления метана из шахтной атмосферы имеет анализ воздухораспределения в горных выработках. Из совокупности методов расчета и оптимального регулирования воздушных потоков в вентиляционных сетях угольных шахт произвольной топологии можно выделить аналитические, графические и

итерационные [1-4]. Наиболее удобными для численной реализации при описании вентиляционных сетей являются итерационные методы, основанные на применении законов потокораспределения Кирхгофа с учетом независимых контуров движения материальных потоков. При этом графической схеме вентиляционной системы сопоставляется ориентированный граф. Так, например, вентиляционная сеть с воздухоподающим стволом и вентилятором главного проветривания моделируется ациклическим ориентированным графом с вершиной, соответствующей устью воздухоподающего ствола и отображающей источник, а также вершиной, соответствующей диффузору вентилятора и отображающей сток. Для определения системы независимых контуров применяют эвристические алгоритмы, которые, к сожалению, плохо поддаются формализации [5, 6].

В развитие рассмотренных подходов для моделирования вентиляционной системы угольной шахты и решения задач воздухораспределения предложено использовать сети Петри, которые задаются набором [7]

$$N = (P, T, I, O, M_0), \quad (1)$$

где  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  – конечное множество позиций;  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  – конечное множество переходов;  $I: T \rightarrow P^\infty$  – входная функция;  $O: T \rightarrow P^\infty$  – выходная функция;  $M_0: P \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$  – начальная маркировка. Движение материальных потоков в сетях Петри отображается перемещением маркеров по позициям сети из начальной маркировки.

Для описания вентиляционной сети ее графической схеме сопоставляется сеть Петри, в которой ветви отображаются позициями, а узлы – переходами. При этом сеть, моделирующая вентиляционную систему шахты, относится к классу ординарных (все дуги единичного веса) маркированных графов, то есть является сетью, каждая позиция которой имеет только один входной и только один выходной переход. Установлено, что для таких сетей справедливо свойство инвариантности для маркеров: система независимых  $S$ -инвариантов однозначно определяет систему независимых ориентированных контуров сети. При дальнейшем построении модели учитывается направление воздушных потоков  $Q = Qe_x$  в системе координат

$$x = xe_x (\|e_x\| = 1). \quad (2)$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа (неразрывности потоков), в каждом узле сети соблюдается материальный баланс потоков

$$\sum_{i \in I_j^-} Q_i - \sum_{i \in I_j^+} Q_i = 0, \quad (3)$$

где  $I/I^+$  – множество исходящих (входящих) дуг для перехода  $j, j=1, \dots, n$ .

В соответствии со вторым законом Кирхгофа (сохранения масс): по любому замкнутому контуру, состоящему из участков сети, суммарные депрессии равны нулю:

$$\sum_{i \in V_k} (e_i^k e_i) R_i Q_i^2 = \sum_{i \in V_k} (e_i^k e_i) h_B, \quad (4)$$

где  $V_k$  – множество позиций, входящих в  $k$ -й независимый контур,  $k=1, \dots, m$ ;  $m$  – количество контуров;  $e_i^k$  – направление обхода  $i$ -й ветви  $k$ -го контура;  $R_i$  – аэродинамическое сопротивление;  $h_B$  – депрессия, развиваемая вентилятором. В большинстве случаев полагают, что для каждой выработки имеет место квадратичный закон аэродинамического сопротивления

$$h_i = R_i Q_i^2, \quad (5)$$

где  $h_i$  – депрессия, теряемая на участке, который моделируется позицией  $p_i$ . Для решения системы (3-4), в основном, используют метод простой итерации [8].

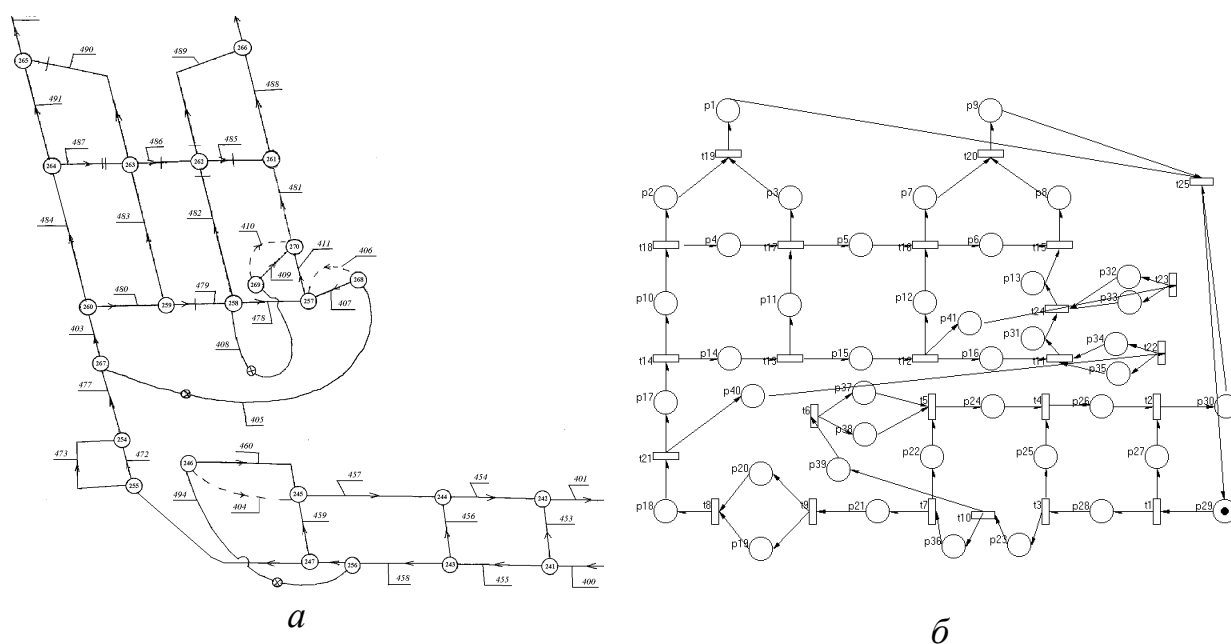
Рассмотрим сеть Петри  $N_1$ , моделирующую вентиляционную систему, с множеством позиций  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  и множеством переходов  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ . Введем новую позицию  $p_{n+1}$  и два перехода  $t_{m+1}$  и  $t_{m+2}$ . Все стоковые позиции соединим с переходом  $t_{m+2}$  как входные позиции. Все истоковые соединим с переходом  $t_{m+1}$  как выходные позиции. Позицию  $p_{n+1}$  соединим с переходами  $t_{m+1}$  и  $t_{m+2}$  так, чтобы  $t_{m+2}$  являлся входным переходом, а  $t_{m+1}$  – выходным. Поместим маркер в позицию  $p_{n+1}$  так, чтобы начальная маркировка содержала единственный маркер в этой позиции. Полученную таким образом сеть обозначим через  $N_2$ . Для сети  $N_2$  с помощью алгоритма Тудика [9], основанного на линейных преобразованиях матрицы инцидентности, можно найти систему  $S$ -инвариантов –  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_l\}$ , которая описывает все возможные пути из истоковых позиций в стоковые. С помощью линейных преобразований векторов системы  $S$  можно получить систему независимых контуров, для которых воздухораспределение рассчитывается на основе (1-5).

Разработанный подход применен для расчета вентиляционной схемы угольной шахты, расположенной в северной части Кемеровского геолого-экономического района Кузбасса.

Вентиляционная схема шахты включает 24 узла и 41 ветвь, со сложными диагональными соединениями (рис. 1, а). Вентиляционной схеме была сопоставлена сеть Петри  $N_3$  (рис. 1, б), содержащая три стоковых и одну истоковую позиции, а также три позиции с установленными вентиляторами местного проветривания (табл. 1).

Для поиска системы независимых контуров введен вспомогательный переход  $t_{25}$ , соединяющий стоковые позиции с истоковой  $p_{29}$ . Начальная маркировка сети  $N_3$  представлена на рис. 1, б.

Заметим, что найденная система (5), помимо задания контуров, обеспечивает определение направления их обхода, необходимое для составления уравнений II-го закона потокораспределения.



**Рис. 1. Графическое представление схемы проветривания горных выработок:**

***а – одностольный ориентированный граф; б – сеть Петри***

**Таблица 1**

***Позиции с заданным расходом сети  $N_3$***

Номер позиции	Входной переход	Выходной переход	Аэродин. сопрот., кмюрг	Кол-во воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$	Примечание
1	19	25	1,50000	4,3	Сток
9	20	25	0,08000	16,3	Сток
29	25	1	0,04400	27,8	Исток
30	2	25	0,00168	7,4	Сток
39	10	6	0,02591	5,5	Вентустановка
40	21	22	0,25010	5,5	Вентустановка
41	12	23	0,00226	5,5	Вентустановка

Система независимых контуров для сети  $N_3$ , полученная с использованием алгоритма [9], имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} (p_{22}, p_{23}, p_{24}, -p_{25}, p_{36}); \\ (p_{25}, p_{26}, -p_{27}, p_{28}); \\ (p_{37}, -p_{38}); \\ (p_{19}, -p_{20}); \\ (p_{34}, -p_{35}); \\ (p_{32}, -p_{33}); \\ (p_4, p_{10}, -p_{11}, -p_{14}); \\ (p_5, p_{11}, -p_{12}, -p_{15}); \\ (-p_6, -p_{12}, p_{13}p_{16}, p_{31}); \\ (p_6, -p_7, p_8); \\ (p_2, -p_3, -p_4). \end{array} \right. \quad (6)$$

При этом начальное приближение  $Q_0 = \{q_1^0, \dots, q_{41}^0\}$  для расчета воздухораспределения методом простой итерации есть решение матричного уравнения, удовлетворяющего условию I-го закона потокораспределения

$$AQ_0 = 0, \quad (7)$$

где  $A$  – матрица инцидентий сети  $N_3$ . Элементы вектора  $Q_0$  являются неизвестными переменными системы линейных уравнений (5), кроме элементов с заданным воздухораспределением из табл. 1, образующими свободные члены уравнений системы. После переноса свободных членов  $B$  в правую часть уравнение (7) может быть преобразовано к виду

$$A^*Q^* = B, \quad (8)$$

где  $A^*$  – преобразованная матрица  $A$ ;  $Q^*$  – вектор размерности  $(n - 7)$ .

Решение системы линейных уравнений (8) методом Гаусса позволило установить воздухораспределение в рассмотренной сети горных выработок (табл. 2). Найденное численное решение подтверждено данными воздушной съемки в сети горных выработок со сходимостью 2 %.

Таким образом, класс сетей Петри – ординарных маркированных графов обладает необходимой и достаточной полнотой структуры для описания вентиляционной схемы угольной шахты, ветви и узлы которой моделируются позициями и переходами сети.

Минимальное порождающее семейство векторов – позиционных инвариантов – определяет систему независимых ориентированных контуров маркированного графа, изоморфных ансамблю независимых траекторий движения воздушных потоков по горным выработкам.

Таблица 2

**Результаты расчета воздухораспределения в сети действующих  
горных выработок**

Номер позиции	Входной переход	Выходной переход	Аэродин. сопрот., кмюрг	Кол-во воздуха, м <sup>3</sup> /с	Депрессия, мм вод. ст.
2	18	19	0,00139	4,4270	0,02724
3	17	19	1,50000	-0,1270	0,02418
4	18	17	0,50000	0,5435	0,14770
5	17	16	0,80000	2,6560	5,64500
6	16	15	0,00300	2,6420	0,02093
7	16	20	1,50000	0,3640	0,19870
8	15	20	0,00070	15,9400	0,17780
10	14	18	0,00267	4,9700	0,06596
11	13	17	0,00167	1,9860	0,00659
12	12	16	1,50000	0,3492	0,18290
13	24	15	0,00080	13,2900	0,14140
14	14	13	0,00210	9,9300	0,20710
15	13	12	0,09500	7,9440	5,99500
16	12	11	0,00240	2,0940	0,01053
17	21	14	0,00200	14,9000	0,44400
18	8	21	0,00167	20,4000	0,69500
19	9	8	0,00300	3,6240	0,03940
20	9	8	0,00014	16,7800	0,03940
21	7	9	0,00485	20,4000	2,01800
22	7	5	0,00100	0,1579	0,24930
23	3	10	0,00079	26,0600	0,53640
24	5	4	0,00400	5,6580	0,12800
25	3	4	3,00000	0,7094	1,51000
26	4	2	0,00421	6,3670	0,17070
27	1	2	3,00000	1,0330	3,19900
28	1	3	0,00212	26,7700	1,51900
31	11	24	0,00090	7,5940	0,05191
32	23	24	0,03000	2,1100	0,13360
33	23	24	0,01000	3,3900	0,11490
34	22	11	0,04400	1,1910	0,06237
35	22	11	0,00400	4,3090	0,07428
36	10	7	0,00200	20,5600	0,84530
37	6	5	0,00300	4,8190	0,06966
38	6	5	0,15000	0,6814	0,06966

При этом предложенный подход к поиску воздухораспределения в горных выработках угольных шахт с применением сетей Петри, моделирующих структуру горных выработок, и выделения независимых контуров с использованием алгоритма, основанного на линейных преобразованиях матрицы инцидентий, может быть эффективно использован для повышения эффективности проектирования схем проветривания угольных шахт.

### Список литературы

1. Машинцов Е.А., Котлеревская Л.В., Криничная Н.А. Управление вентиляцией в угольной шахте // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 7. С. 188-195.
2. Пучков Л.А., Бахвалов Л.А. Методы и алгоритмы автоматического управления проветриванием угольных шахт. М.: Недра, 1992. 39 с.
3. Качурин Н.М., Каледина Н.О., Качурин А.Н. Выделения метана с поверхности обнажения угольного пласта при высокой скорости продвижения подготовительного забоя // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2013. № 3. С. 25-31.
4. Определение источников газовыделения в атмосферу выемочного участка на основе измерений изотопного состава углерода метана / О.В. Тайлаков, М.П. Макеев, А.В. Герасимов, Д.С. Коровин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 5. С. 73-79.
5. Деордица Ю.С. Расчет потокораспределения в инженерных сетях, моделируемых ациклическими графами // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 1984. № 2. С. 37-42.
6. Diestel R. Graph Theory. NY: Springer-Verlag, 2005. 422 с.
7. Мурата Т. Сети Петри: Свойства, анализ, приложения // ТИИЭР. 1989. № 77. С. 41-85.
8. Круглов Ю.В., Исаевич А.Г., Левин Л.Ю. Сравнительный анализ современных алгоритмов расчета вентиляционных сетей // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2006. № 5. С. 32-37.
9. Есикова Т.Н. Алгоритм построения множества достижимых маркировок для анализа свойств сетей Петри // Однородные вычислительные системы из микроЭВМ (Вычислительные системы). 1983. Вып. 97. С. 65-73.

*Тайлаков Олег Владимирович, д-р техн. наук, проф., [oleg2579@gmail.com](mailto:oleg2579@gmail.com), Россия, Кемерово, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук*

*MODELING OF THE AIR DISTRIBUTION PROCESSES IN EXISTING ENTRIES OF COAL MINES BASED ON PETRY NET*

*O.V. Tailakov*

*The methodological approach to designing models of artificial air distribution in coal mine entries based on the network representation of bipartite oriented graphs has been proved. It is shown that the air distribution in the mine entries is evaluated by defining of closed contours of the ventilation network corresponding to the positional semi-flows of the Petri nets and using the method of successive approximations.*

*Key words: entries, network model, structural and behavioral properties of Petri nets.*

*Tailakov Oleg Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, [oleg2579@gmail.com](mailto:oleg2579@gmail.com), Russia, Kemerovo, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*

#### Reference

1. Mashintsev E. A., Kotlarevsky L. V., Krinichnaya N. And. Ventilation control in a coal mine // Izvestia of the Tula state University. Technical science. 2014. No. 7. Pp. 188-195.
2. Puchkov L. A., Bakhvalov L. A. Methods and algorithms of automatic control of ventilation of coal mines. Moscow: Nedra, 1992. 39 PP.
3. Kachurin N. M., Kaledina N. O., Kachurin A. N. methane Emissions from the surface of coal seam outcrop at a high rate of advance of the preparatory face // Izvestiya vyshe uchebnykh zavedeniy. Mining journal. 2013. No. 3. Pp. 25-31.
4. Determination of sources of gas release into the atmosphere of the excavation site on the basis of measurements of the isotopic composition of carbon methane / O. V. Tailakov, M. p. Makeev, A.V. Gerasimov, D. S. Korovin // Bulletin of the Kuzbass state technical University. 2017. No. 5. Pp. 73-79.
5. Deorditsa Yu. s. Calculation of flow distribution in engineering networks modeled by acyclic graphs // proceedings of higher educational institutions. Mining journal. 1984. No. 2. S. 37 - 42.
6. Diestel R. Graph Theory - NY: Springer-Verlag, 2005. 422 PP.
7. Murata T. Petri Nets: Properties, analysis, applications. 1989. No. 77. Pp. 41-85.
8. Kruglov Yu. V., Isaevich A. G., Levin L. Yu. Comparative analysis of modern algorithms for calculating ventilation networks // proceedings of higher educational institutions. Mining journal. 2006. No. 5. Pp. 32-37.
9. Yoshikova T. N. Algorithm for constructing a set of achievable markings for analyzing the properties of Petri nets // Homogeneous computing systems from Micro-computers (Computing systems). 1983. Vol. 97. C. 65-73.