

# УРАВНЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА И ЕГО ФОРМЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЕНТИЛЯЦИИ ШАХТ

Буссугу У.Д.<sup>1</sup>, Качурин Н.М.<sup>2</sup> Email: Boussougou658@scientifictext.ru

<sup>1</sup>Буссугу Ульрих Дави – аспирант;

<sup>2</sup>Качурин Николай Михайлович – доктор технических наук, профессор,  
кафедра геотехнологий и строительства подземных сооружений,  
Тульский государственный университет,  
г. Тула

**Аннотация:** в статье представлено математическое описание процессов вентиляции горных шахт, которое проводится на основе стационарного подхода с допущением о несжимаемости среды. Горная выработка рассматривается как воздухопровод, имеющий некоторое аэродинамическое сопротивление. Рассмотрены законы, на которых базируются задачи об установлении распределения воздуха по выработкам вентиляционной сети при установившихся вентиляционных режимах. В хронологическом порядке представлены исследования в области теории вентиляционных сетей, указаны их преимущества и недостатки.

**Ключевые слова:** шахтная атмосфера, аэрология, вентиляция, проветривание, моделирование, вентиляционная сеть, аэродинамические характеристики.

## EQUATION OF AIR FLOW AND THEIR FORM FOR CALCULATION OF MINE VENTILATION

Boussougou U.D.<sup>1</sup>, Kachurin N.M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Boussougou Ulrich Davy – Postgraduate;

<sup>2</sup>Kachurin Nikolai Mikhailovich - Doctor of Technical Sciences, Professor,  
GEOTECHNOLOGY AND CONSTRUCTION OF UNDERGROUND STRUCTURES DEPARTMENT,  
TULA STATE UNIVERSITY,  
TULA

**Abstract:** the article presents a mathematical description of the processes of ventilation of mountain mines, which is carried out on the basis of a stationary approach with the assumption of non-compressibility of the environment. Mining is considered as an air duct with some aerodynamic resistance. The laws are considered, on which the tasks of establishing the distribution of air through the workings of the ventilation network with steady ventilation modes are based. The researches in the field of the theory of ventilation networks are presented, their advantages and disadvantages are indicated in chronological order.

**Keywords:** mine atmosphere, aerology, ventilation, airing, modeling, ventilation network, aerodynamic characteristics.

УДК 622

Процесс вентиляции в выработках предназначен для обеспечения необходимого расхода воздуха для поддержания нормальной физиологической деятельности человека, разбавления и выноса вредных газов и пыли, нормальных тепловых условий [10, 6]. Такие параметры воздушного потока, как расход, скорость его движения, турбулентность отвечают за решение этой задачи. Эффективность проветривания очистных выработок в значительной степени зависит от схемы вентиляции [3, 4].

Шахтную вентиляционную систему (ШВС) можно представить как систему, состоящую из четырех основных подсистем: «Вентиляционная установка», «Вентиляционная сеть», «Вентиляционные устройства», «Подсистема контроля и управления».

Расчет проветривания шахт и рудников в настоящее время на всех шахтах России проводится на основе стационарного подхода в предположении несжимаемости среды. В условиях проветривания шахта является единой вентиляционной системой, в состав которой входит сеть горных выработок, предназначенных для движения воздуха, в которых находятся источники тяги - вентиляторы. Таким образом, горная выработка рассматривается как воздухопровод, имеющий некоторое аэродинамическое сопротивление. При этом данное сопротивление зависит от таких геометрических параметров самой выработки и ее аэродинамических характеристик [7, 8].

При установившихся вентиляционных режимах постановка задачи об установлении распределения воздуха по выработкам вентиляционной сети базируется на следующих законах [10]:

Закон сопротивления в каждой j-й ветви:

$$h_j = R_j \cdot Q_j^2, \quad (1)$$

Закон сохранения массы воздушных потоков в узлах:

$$\sum_{j \in i} \rho_i Q_i = 0, \quad (2)$$

Закон сохранения энергии воздушных потоков в контурах:

$$\sum_{j \in i} \varepsilon_i h_i = \sum_{j \in i} \varepsilon_i h_{bi} + h_{ei}, \quad (3)$$

где  $i, j$  – номер узла и номер ветви соответственно;  $h$  – депрессия ветви, Па;  $R$  – аэродинамическое сопротивление ветви,  $\text{Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^8$ ;  $Q$  – объемный расход воздушного потока,  $\text{м}^3 / \text{с}$ ;  $h_b$  – депрессия вентиляторов, Па;  $h_e$  – депрессия естественной тяги в контуре, Па;  $\rho$  – средняя плотность воздуха в ветви,  $\text{кг} / \text{м}^3$ ;  $\varepsilon$  – коэффициент направления воздушного потока (для первоначально принятого направления  $\varepsilon = 1$ ; для противоположенного направления  $\varepsilon = -1$ ).

В ходе изменения температуры, давления и влажности воздуха плотность воздуха в горных выработках также изменяется, вследствие чего в каждом вентиляционном контуре возникает тепловая тяга:

$$h_e = g \sum_{j \in j} \rho_i (z_n - z_k), \quad (4)$$

где  $z_n$  – геодезическая высота в начале ветви, м;  $z_k$  – геодезическая высота в конце ветви, м;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м} / \text{с}^2$ .

Изменение плотности воздуха приводит к процессам аэродинамического сопротивления ветвей и депрессии вентиляторов вследствие изменения объемного расхода воздуха. Это учитывается путем введения поправочного коэффициента, который есть отношение стандартного значения плотности воздуха  $\rho_c$  к фактической плотности  $\rho$  ( $\rho_c / \rho$ ), на который умножаются значения  $Q_c, R_c, h_c$ , вычисленные при стандартной плотности. Стоит учесть, что при постоянной плотности воздуха в вышепредставленных уравнениях вместо массового расхода воздуха используется объемный расход.

В уравнении (3) депрессии вентиляторов рассчитываются по их напорным характеристикам, выраженным, в общем случае, в виде:

$$h_2 = a_0 + a_1 Q_c + a_2 Q_c^2 + \dots + a_n Q_c^n. \quad (5)$$

При этом, в большинстве случаев, для практических расчетов достаточно использовать первые три члена полинома (5). Уравнения (1)-(5) решаются как система уравнений с использованием методов теории графов и численных методов.

В качестве модели вентиляционной системы рудника принимается ориентированный граф, в котором ветви отвечают за направление движения воздуха, а узлы определяют места разделения или слияния отдельных струй. Вес ветви – это как набор отдельных параметров, например, аэродинамическое сопротивление, депрессия или расход воздуха, так и взвешенный показатель качества проветривания ветви, устанавливаемый по ряду параметров.

На сегодняшний день в теории вентиляционных сетей появились два направления, включающие разработку методов определения расходов воздуха и методов оптимального регулирования расходов воздуха в ветвях сети. Для обособления разработанных методов, приемов и способов решения различных сетевых задач обратимся к одной из классификаций, описанной в работе [12]. Согласно этой классификации различают следующие методы: 1. линеаризации; 2. последовательных приближений; 3. минимизации специальных функций; 4. Метод теории графов. Представим особенности каждого из этих методов.

В основе методов линеаризации лежит линейная аппроксимация нелинейных законов сетей. В этом направлении работали А. С. Попов, А.Ф. Воропаев, С. Цой и Е.И. Рогов и др. Так, методы А.С. Попова и А.Ф. Воропаева связаны с линеаризацией квадратных уравнений сетей по приближенным формулам [6]. Данные методы приемлемы только для расчета естественного распределения воздуха в сети.

Исследования С. Цоя и Е. И. Рогова привели к тому, что метод линеаризации уравнений законов сетей стал возможным для использования для сети любой сложности при любом количестве произвольно включенных вентиляторов [11].

Основные преимущества данного метода заключаются в простоте составления системы линеаризованных уравнений по узлам и независимым циклам и быстрая сходимость вычислительного процесса. К существенным недостаткам относятся следующие моменты. Во-первых, для быстрой сходимости процесса вычислений задают первое приближение расходов воздуха, близкое к исходному значению, что вызывает большие трудности при расчете сложных сетей. Во-вторых, интуитивно задают места установки регулировочных устройств при решении задач регулирования. В сложных сетях это может стать причиной несовместимости условий поставленной задачи.

Методы последовательных приближений обосновывались в работах В.Г. Лобачева, П. Ренуар, В.И. Белова, М.М. Андрияшева и др. [11]. Общий недостаток этих методов заключается в том, что все они пригодны лишь для расчета сетей при естественном распределении воздуха в ветвях сети [1, 12].

Основные исследования в этой области провели П.Б. Тянь и В.И. Россочинский. В работе Р.Б. Тяня представлен частный случай: в состав сети входят вентиляторы, охарактеризованные квадратным полиномом без линейной части [11]. В.И. Россочинский предложил упрощенную формулу для вентиляционных сетей, содержащих источники тяги, но расчет с использованием данного выражения получается весьма грубым [11].

Исследования в области метода последовательных приближений для решения вентиляционных задач активно проводятся и в настоящее время. Они являются актуальными вследствие простоты идеи последовательных приближений и легкости численной реализации на ЭВМ [5].

Вторая половина 20-го века знаменательна тем, что появились новые подходы к решению вентиляционных задач, в которых задействованы процессы математического программирования, в том числе методы минимизации специальных функций. Данные методы использовались для решения таких задач: либо не имеющих аналитического решения, либо характеризующихся большой размерностью. Замена процедуры решения системы уравнений минимизацией какой-либо искусственной функции являлась основой этих методов.

В.С. Кузьмин для минимизации специальной функции предложил использовать один из четырех методов минимизации: поочередного уточнения параметров, групповой релаксации, наискорейшего спуска и признанный наиболее оптимальным – метод модифицированный метод наискорейшего спуска [5].

Применение для исследования топологии вентиляционных сетей теории графов было впервые предложено С. Цоем. Он рекомендовал составлять уравнения законов сетей, используя матрицы инцидентности дуг и независимых контуров [5, 8]. Было доказано, что система, полученная на основе минимального дерева графа, сходится быстрее всего.

А.Г. Евдокимовым, также рассматривавшим вентиляционную сеть как ориентированный граф, представлена топологическая матрица знаков контуров для ветвей дерева. Данная матрица используется для составления уравнений первого и второго законов сетей с учетом характеристик источников тяги [2]. На основе анализа математических описаний процессов проветривания горных выработок можно сделать вывод, что в настоящее время в методологии проектирования вентиляции используется «полуматематические и полуэмпирические теории», основой которых являются формулы, полученные опытным путём для определённых горно-геологических условий.

Выполненный анализ общих методов расчета вентиляционных сетей позволяет прийти к заключению о том, что в них не рассматриваются задачи регулирования, существуют лишь некоторые, распространяющиеся на частные случаи этих методов. Необходимо отметить, что все эти методы требуют предварительного выбора мест установки регулирующих устройств, что в сложных сетях может стать причиной несовместности условий для решения задачи.

Общая постановка задачи о регулировании воздухораспределения в рудничной вентиляционной сети представляется достаточно сложной для осуществления ее решения в аналитическом виде.

В целом можно утверждать, что практически все перечисленные методы имеют ряд практических и интерпретационных сложностей, которые не позволяют применить разработанные алгоритмы и программы при решении многих оптимизационных проблем.

#### *Список литературы / References*

1. Бодягин М.Н. Проветривание шахт. М.: Госгортехиздат, 1961. 231 с.
2. Евдокимов А. Г. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях / А.Г. Евдокимов, А.Д. Тевашев. Харьков: Высшая школа, 1980. 130 с.
3. Каледина Н.О. Проектирование вентиляции при строительстве подземных сооружений / Н.О. Каледина, С.С. Кобылкин, О.С. Каледин, А.С. Кобылкин // М.: МГГУ, 2016. 80 с.
4. Клебанов Ф.С. Воздух в шахте. М.: Изд-во «Имидж», 1995. 575 с.
5. Круглов Ю.В. Методы совершенствования современных алгоритмов расчета стационарного воздухораспределения в вентиляционных сетях // Матер. ежегодной научной сессии 2007 ГИ Уро РАН. URL: <http://www.mi-perm.ru/sess2007/sess2007-121.html/> (дата обращения: 28.02.2019).
6. Милетич А.Ф. Утечки воздуха и их расчет при проветривании шахт. М.: Недра, 1968. 146 с.
7. Рудничная вентиляция: Справочник / Гращенков Н.Ф. и др; под ред. К.З. Ушакова. М.: Недра, 1988. 440 с.
8. Скочинский А.А. Рудничная вентиляция / А.А. Скочинский, В.Б. Комаров. Москва, Ленинград: Углетехиздат, 1949. 443 с.
9. Тянь Р.Б. Управление проветриванием шахт / Р.Б. Тянь, В.Я. Потемкин. Киев: Наукова думка, 1977. 200 с.
10. Ушаков К.З. Аэрология горных предприятий / К.З. Ушаков, А.С. Бурчаков, Л.А. Пучков, И.И. Медведев // М.: Недра, 1987. 421 с.

11. *Цой С.* Основы теории вентиляционных сетей / С. Цой, Е.И. Рогов. Алма-Ата: Наука, 1965. 281 с.

12. *Цой С.* Принцип минимума и оптимальная политика управления вентиляционными и гидравлическими сетями / С. Цой, Г.К. Рязанцев. Алма-Ата: Наука, 1968. 257 с.