

К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЯХ ШАХТ, УЧИТЫВАЮЩЕЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Станислав Александрович Павлов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, тел. (383)205-30-30, доб. 179, e-mail: pavlov_s_a@inbox.ru

В статье отражена важность проведения расчета нестационарного воздухораспределения в вентиляционных сетях шахт, учитывающая тепловентиляционные параметры атмосферы горных выработок. Проведено исследование изменения температуры воздушного потока при его движении по выработке, имеющей постоянную температуру стенок. Для сетевой математической модели нестационарного воздухораспределения в вентиляционной сети рудника разработан новый решающий блок, учитывающий выявленные закономерности изменения температуры воздушного потока от его скорости, температуры и площади сечения выработок, и позволяющий проводить расчет изменения температуры воздуха при его движении по выработкам. Проведено сравнение полученных результатов изменения температуры воздуха при его движении по выработке с аналитическим методом расчета и при решении задачи методом конечных объемов. Полученные результаты моделирования имеют хорошую сходимость. Величины отклонения, полученных в сетевой модели нестационарного воздухораспределения от метода конечных объемов, не превышает 7 %.

Ключевые слова: вентиляция, проветривание шахт, тепловой режим, вентиляционная сеть, численное моделирование, математическая модель нестационарного воздухораспределения, решающий блок.

SOLUTION OF THE PROBLEM OF TRANSIENT AIR DISTRIBUTION IN VENTILATION NETWORKS OF MINES, TAKING INTO ACCOUNT THERMODYNAMIC AIR FLOW PARAMETERS

Stanislav A. Pavlov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., phone: (383)205-30-30, extension 179, e-mail: pavlov_s_a@inbox.ru

This paper highlights the importance of calculating transient air distribution in mine ventilation networks, taking into account heat ventilation parameters of mine working atmosphere. The change in the temperature of an air flow as it moved along a working with a constant wall temperature was studied. For the network mathematical model of transient air distribution in a ventilation network of the mine, a new resolver was developed which takes into account the revealed regularities of change in air flow temperature from its velocity, temperature and cross-sectional area of mine workings, and allows calculating the change in air temperature as it moves along mine workings. The results of change in air temperature during its movement along the mine working were compared with analytical calculation method and in solving the problem by finite volume method. The obtained simulation results have good convergence. The deviation values obtained in the network model of transient air distribution from the finite volume method do not exceed 7 %.

Key words: ventilation, ventilation of mines, thermal conditions, ventilation network, numerical modeling, mathematical model of transient air distribution, resolver.

Введение

При строительстве и эксплуатации шахт и рудников, с увеличением глубины ведения горных работ возрастает температура окружающего породного массива и увеличиваются затраты на подачу свежего воздуха с поверхности в эти выработки. Из-за этого формируются не соответствующие нормам микроклиматические условия в рабочих зонах горных выработок глубоких горизонтов.

Реализация мероприятий по нормализации микроклиматических условий в горных выработках связана со значительными капитальными и эксплуатационными затратами. В современных рыночных условиях дополнительные расходы, связанные с внедрением систем нормализации микроклиматических условий, зачастую делают нецелесообразной отработку новых глубокозалегающих запасов полезных ископаемых [1-3]. Поэтому необходимо усовершенствовать способы прогнозирования и оценки эффективности применения внедряемых систем нормализации микроклиматических условий еще на стадии проектирования подземного горного предприятия.

Проблемы регулирования и обеспечения требуемых микроклиматических параметров в подземных рабочих зонах глубоких шахт и рудников вызвали интенсивное развитие исследований в данном направлении в начале 40-х годов XX века. Проведены обширные исследования теплофизических процессов, формирующих тепловой режим шахт и рудников, разработаны методы расчета теплового режима и прогноза термовлажностных параметров атмосферы горных выработок. Решению этих вопросов посвящены работы О.А. Кремнева, А.Н. Шербаня, А.Ф. Воропаева, Ю.Д. Дядькина, Ю.В. Шувалова, Б.И. Медведева и других. Однако, как отмечают сами авторы, предлагаемые ими расчетные методы являются приближенными и нуждаются в дальнейшем уточнении.

Следует отметить, что постоянно изменяющаяся во времени сеть выработок шахт и рудников, приводит к постоянному перераспределению воздушных потоков. Изменения скоростей движения потоков воздуха оказывает существенное влияние на тепловой режим подземного горного предприятия. При этом, задача нестационарного воздухораспределения в вентиляционных сетях шахт, учитывающая тепловентиляционные параметры атмосферы горных выработок, не решена. Прогноз тепловентиляционного режима шахт и рудников с учетом факторов, влияющих на микроклиматические условия в рабочих зонах, а также динамики развития горных работ, является весьма сложной задачей. Для ее решения требуются разработки специальных компьютерных программ, реализующих методы расчета тепловентиляционных режимов, учитывающих нестационарность процессов теплообмена в горных выработках и тем самым повышающих точность расчета.

Это подтверждает, что исследование тепловентиляционных задач, особенно в их нестационарной постановке, является весьма актуальным.

Целью исследований в представленной работе является разработка нового расчетного блока для сетевой математической модели нестационарного возду-

хораспределения в вентиляционной сети рудника, учитывающего термодинамические параметры воздушного потока.

Методы и материалы

Увеличение протяженности подземных выработок, объемов добычи полезного ископаемого и вызванное им повышение потребности рабочих зон в свежем воздухе делают управление воздушными потоками в вентиляционных сетях крупных горнодобывающих предприятий исключительно сложной задачей. Эффективному решению задач вентиляции в современных подземных горнодобывающих предприятиях способствует развитие и применение средств промышленной автоматизации, вычислительной техники и методов математического моделирования аэрогазодинамических и тепловых процессов, происходящих в сети подземных выработок [4].

В работах [5-7] предложены способы моделирования переходных процессов в вентиляционных выработках, с учетом их акустических параметров, описываемых системой уравнений (1). На ее основе в среде Matlab разработан решающий блок (рис. 1) из которых собирается вся исследуемая вентиляционная сеть.

$$\begin{cases} Q_{\text{вх}} = \frac{1}{L} \int (P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}} - R Q_{\text{вых}} |Q_{\text{вых}}|) dt \\ P_{\text{вых}} = \frac{1}{C} \int (Q_{\text{вых}} - Q_{\text{вх}}) dt \end{cases}; \quad (1)$$

$$L = \frac{\rho l}{S};$$

$$C = \frac{lS}{\rho c^2};$$

где R – аэродинамическое сопротивление выработки; $Q_{\text{вх}}$ и $Q_{\text{вых}}$ – расход воздуха на входе и на выходе решающего блока; $P_{\text{вх}}$ и $P_{\text{вых}}$ – давление на входе и выходе решающего блока; L и C описывают инерционные параметры воздушного потока и являются его акустической массой и акустической гибкостью, соответственно; ρ – плотность воздуха; l – длина исследуемого участка; S – площадь поперечного сечения; c – скорость звука в воздушной среде.

Данный решающий блок (рис. 1) позволяет решать сетевые задачи нестационарного воздухораспределения в объемных величинах. Для решения тепловых задач, необходимо перейти от объемных к массовым величинам (2).

$$Q_m = Q \cdot \rho, \quad (2)$$

где Q_m – массовый расход воздуха (кг/с), Q – объемный расход воздуха (м³/с), ρ – плотность воздуха (кг/м³)

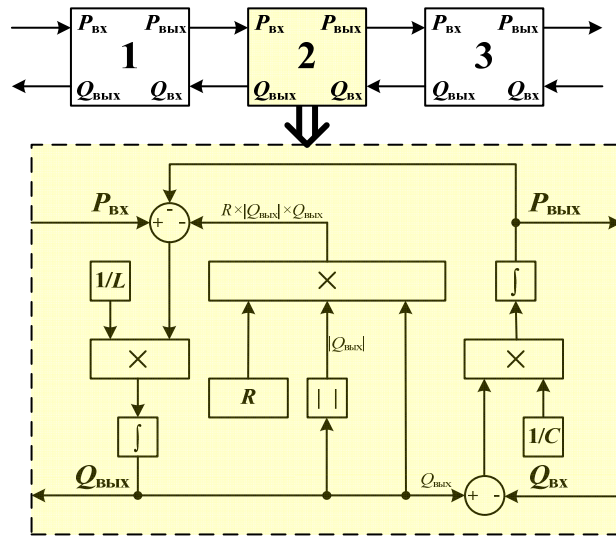


Рис. 1. Схема решающего блока в среде Matlab

С середины XX века, при проектировании газо- и нефтепроводов для оценки распределения температуры с успехом использовалась известная формула В.Г. Шухова [8]:

$$T = T_{нар.} + (T_1 - T_{нар.}) \cdot \exp\left(-\frac{\alpha \cdot \pi \cdot d}{C_p \cdot Q_m} \cdot l\right), \quad (3)$$

где T – температура газа на выходе из трубы; $T_{нар.}$ – наружная температура; T_1 – температура газа на входе в трубу; α – коэффициент теплоотдачи; d – диаметр трубы; C_p – теплоемкость газа при постоянном давлении; l – длина трубопровода.

Эта формула была получена при расчете остывания нагретой нефти, перекачиваемой по трубопроводу, без учета тепла, выделяющегося вследствие наличия гидравлических сопротивлений. Полагалось, что формула Шухова вполне точно подходит для расчета температуры идеального газа, движущегося в трубе с дозвуковой скоростью.

В качестве примера, рассмотрим решение этой задачи для следующих исходных данных:

- длина исследуемой выработки (L) – 400 м;
- шероховатость внутренней поверхности выработки (Δ) принята – 0,01 м;
- температура внутренней поверхности ($t_{ст.}$) всей выработки была постоянной и составляла – 0 °С;
- площадь поперечного сечения выработки (S): 11 м²;
- начальная температура воздуха ($t_{н.воз.}$), входящего в выработку: 30 °С;
- скорость воздушного потока (V), при его движении в выработке: 1 м/с.

Известно, что существующие приближенные методы расчета тепло-воздухораспределения в трубопроводах часто не отражают с необходимой точностью параметров флюида в реальных условиях. К примеру, анализ полу-

ченных фактических данных при эксплуатации нефтепровода «Ухта-Приводино-Ярославль» показывает, что погрешность расчета средней температуры нефти аналитическим способом по сравнению с натурными замерами достигает 35 % [9-10].

Из-за того, что в указанной формуле (3) не учитывается влияние аэродинамического (гидравлического) сопротивления выработки (основной параметр при решении сетевых задач), которое оказывает значительное влияние на воздухораспределение и температурный режим проветривания выработок, необходимо провести сравнение результатов аналитического расчета с результатами, полученными численным решением с использованием метода конечных объемов. В качестве сравнения, рассмотрим результаты решения этой задачи методом конечных объемов (рис. 2, сплошная линия).

Из рис. 2 видно, что решение задачи аналитическим способом (по формуле В.Г. Шухова для вязкой нефти и газа в трубопроводе) дает завышенное на 9-20 % значение температуры воздушного потока при его движении в горной выработке. Поэтому, чтобы определить изменения средней температура воздуха в выработке, с учетом ее аэродинамического сопротивления, проведена серия численных экспериментов методом конечных объемов.

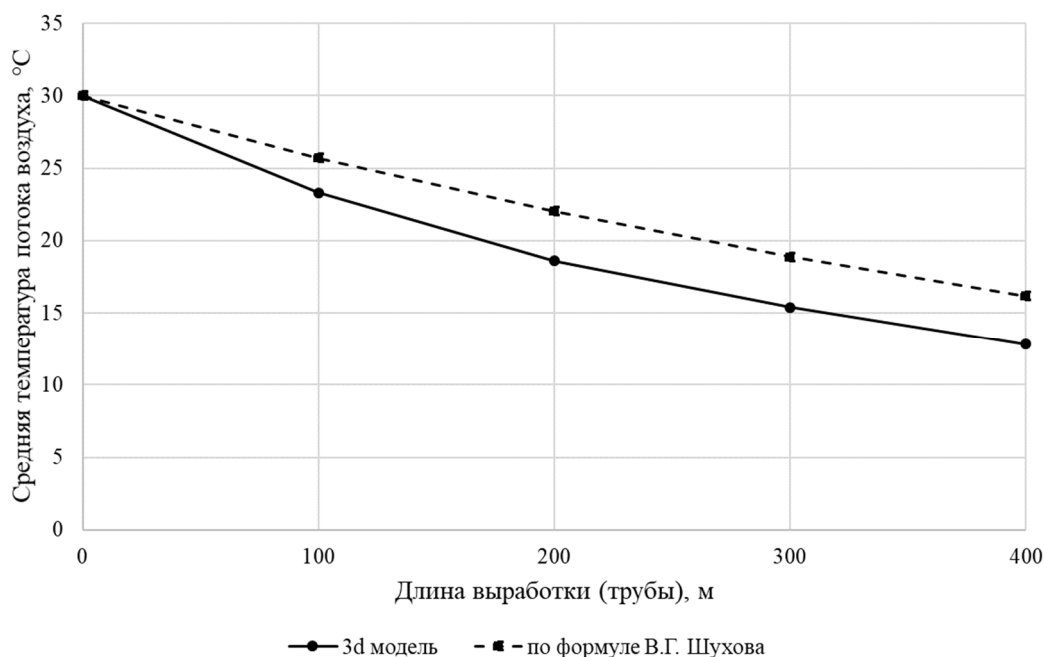


Рис. 2. Графики изменения средней температуры воздушного потока

Результаты

Для выявления общих закономерностей изменения температуры воздушного потока по длине выработки, принято допущение, что температура внутренней поверхности выработки – величина постоянная. Влияние теплопровод-

ности окружающего массива (его нагрева и охлаждения), будет учтено в решающем блоке в последующих исследованиях.

Проведен анализ результатов расчета установившегося режима воздухо-распределения в выработке. Определены средние температуры воздуха в сечениях исследуемой выработки через каждые 50 м. На основе этих данных построены графики изменения температуры воздуха, при его движении в выработке.

В результате численных экспериментов, выявлена общая зависимость изменения средней температуры потока воздуха (4) по длине выработки. Качественно, полученная зависимость совпадает с формулой Шухова.

$$t = \Delta t \cdot \exp(k \cdot L), \quad (4)$$

где t – средняя температура воздуха в конце исследуемой выработки; Δt – разница начальной температуры входящего воздушного потока и температуры внутренней поверхности выработки; L – расстояние от начала выработки до сечения, в котором определяется средняя температура воздуха; k – коэффициент, зависящий от разницы температуры входящего воздушного потока и стенки выработки Δt , площади поперечного сечения S и массового объема воздуха Q_m .

Выяснилось, что коэффициент k значительно зависит от скорости воздушного потока, особенно при величинах до 1 м/с (рис. 3). Поэтому при малых скоростях движения воздушного потока, необходимо принимать точные значения полученного коэффициента k .

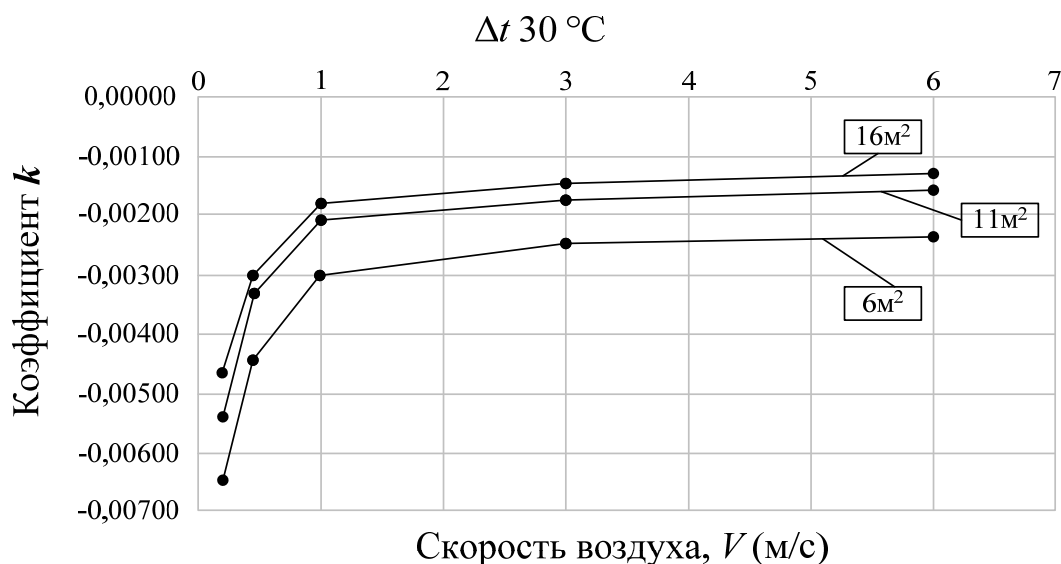


Рис. 3. Величина коэффициента k , в зависимости от скорости потока воздуха и поперечного сечения выработки, при $\Delta t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

Для удобства обработки данных, значения коэффициента k были сведены в таблицу.

Значения коэффициента k

Скорость воздушного потока, V (м/с)	Разница температур воздушного потока и внутренней поверхности выработки, Δt ($^{\circ}\text{C}$)	Площадь сечения, S (m^2)		
		6	11	16
		коэффициент k		
0,2	30	-0,00646	-0,00535	-0,00461
	20	-0,0062	-0,005	-0,00437
	10	-0,0059	-0,0044	-0,00413
0,45	30	-0,00444	-0,00329	-0,00303
	20	-0,0044	-0,00317	-0,00282
	10	-0,0037	-0,00266	-0,00239
1	30	-0,003	-0,0021	-0,00183
	20	-0,00294	-0,002	-0,0018
	10	-0,00311	-0,00223	-0,00164
3	30	-0,00247	-0,00176	-0,00147
	20	-0,00244	-0,00173	-0,00148
	10	-0,00247	-0,00171	-0,00139
6	30	-0,00237	-0,00158	-0,00131
	20	-0,00243	-0,00164	-0,00132
	10	-0,00248	-0,00172	-0,00133

С учетом полученных результатов, был разработан новый решающий блок, учитывающий тепловентиляционные параметры участка вентиляционной сети (рис. 4).

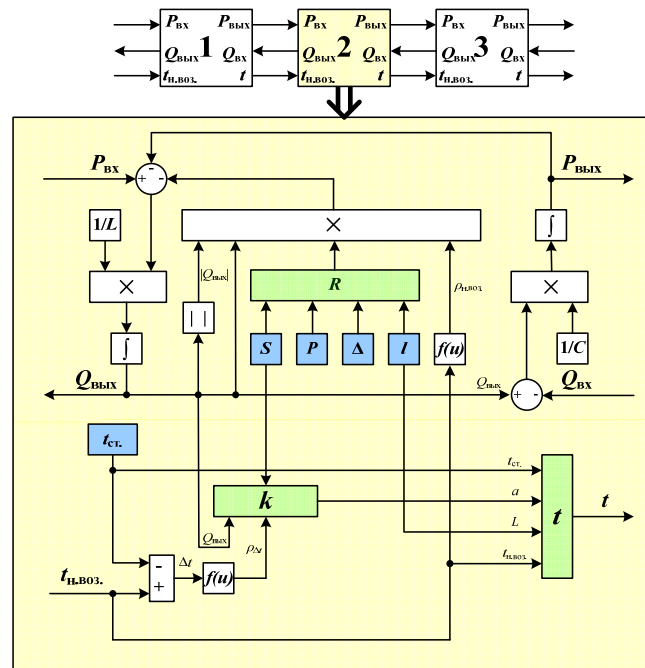


Рис. 4. Схема нового решающего блока в среде Matlab, учитывающего тепловентиляционные параметры моделируемого участка вентиляционной сети

В новом расчетном блоке был добавлен «элемент R », в котором проводится расчет аэродинамического сопротивления участка вентиляционной сети (5), на основании геометрических параметров (исходных данных) исследуемой выработки [11]:

$$R = \frac{\alpha \cdot P \cdot l}{S^3} \quad (5)$$

где R – аэродинамическое сопротивление выработки ($\text{Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^8$), α – коэффициент аэродинамического сопротивления трения, P – периметр поперечного сечения выработки (м), l – длина выработки (м), S – площадь поперечного сечения выработки (м^2)

Добавленный «элемент k » – в котором проводится расчет коэффициента k , на основании поступающих в расчетный блок участка вентиляционной сети данных. Результат расчета в «элементе k » используется для решения уравнения (4), которое реализовано в «элементе t » (см. рис. 4).

Результатом расчета нового решающего блока становится величина средней температуры потока воздуха, которая является исходной для последующего решающего блока.

Таким образом, для решения тепловентиляционной задачи в вентиляционной сети разработан новый расчетный блок, позволяющий рассчитать воздухо-распределение и тепловой режим участка сети горных выработок с учетом интенсивности теплообмена воздушной струи с окружающим массивом пород и нестационарности воздухо-распределения в сети горных выработок.

Алгоритм совместного решения задачи тепло- воздухо-распределения заключается в следующем. Сначала задается топология сети выработок и их геометрические параметры. Принимается значение температуры воздуха на входе в вентиляционную сеть и распределение температур внутренних поверхностей выработок во всех ветвях вентиляционной системы.

При запуске расчета, решающие блоки рассчитывают аэродинамическое сопротивление моделируемого участка, воздухо-распределение и среднюю температуру воздушного потока на выходе из него, основываясь на исходных и полученных данных.

Обсуждение

Проведем проверку результатов, полученных на сетевой модели воздухо-распределения, учитывающей тепловентиляционные параметры, и решенных методом конечных объемов для протяженной выработки, например, с такими исходными параметрами: $S = 11 \text{ м}^2$; $L = 1200 \text{ м}$; $V = 1 \text{ м/с}$; $t_{\text{н.воз.}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{ст.}} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Из полученных результатов моделирования изменения средней температуры воздушного потока (рис. 5) видно, что они имеют хорошую сходимость. Оценка величины отклонения результатов, полученных в сетевой модели от метода конечных объемов, не превышает 7 %. Отклонение результатов расчета по формуле В.Г. Шухова составили от 10 до 65%.

Следует отметить, что решение данной задачи методом конечного объема потребовало более 52 часов (на компьютере с процессором core i5, 4 ядра). Решение задачи в сетевой модели заняло не более 20 секунд.

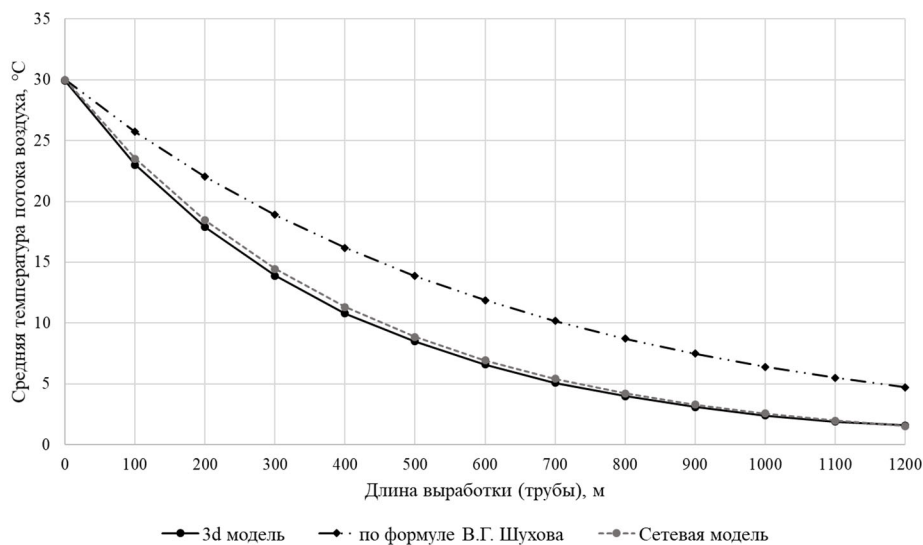


Рис. 5. Сравнение результатов расчета средней температуры воздуха по длине выработки

Заключение

Разработан новый решающий блок для сетевой математической модели нестационарного воздухораспределения в вентиляционных сетях рудников, учитывающий выявленные закономерности изменения температуры воздушного потока от его скорости, температуры и площади сечения выработок, и позволяющий проводить расчет изменения температуры воздуха при его движении по выработкам.

Полученная таким образом сетевая математическая модель нестационарного воздухораспределения, позволяет рассчитать тепло-воздухораспределение с достаточной точностью, при этом время расчетов в 10^4 раз быстрее, чем при использовании методом конечных объемов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Луговский С.И. Проветривание глубоких рудников. – Госгортехиздат, 1962. – 324 с.
2. Малахов Г. М., Черноус А. П. Вскрытие и разработка рудных месторождений на больших глубинах. – Госгортехиздат, 1962.
3. Шувалов Ю.В. Регулирование теплового режима шахт и рудников Севера: Ресурсосберегающие системы – Л.: Издательство Ленинградского университета, 1988. – 196 с.
4. Круглов Ю.В. Разработка системы автоматического управления проветриванием рудника на основе алгоритма оптимизации воздухораспределения / Круглов Ю.В., Казаков Б.П., Шалимов А.В. // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: тр. конф. / ИГД СО РАН. – Новосибирск, 2007. – Т. II. – С. 247 – 252.

5. Петров Н.Н. Электронная модель системы автоматического управления проветривания шахт / Н.Н. Петров, П.Н. Ермолаев, П.Т. Пономарев // Автоматическое управление в горном деле. – Новосибирск: Б.И., 1971, с. 89 – 93
6. Петров Н.Н. Методы синтеза систем автоматического регулирования вентиляторов главного проветривания шахт / Н.Н. Петров, П.Н. Ермолаев // Автоматическое управление в горном деле. – Новосибирск: Б.И., 1971, с. 23 – 49
7. Лапко В.В. Математическая модель переходных аэродинамических процессов в вентиляционных сетях с сосредоточенными и распределенными параметрами / В. В. Лапко, О.Ю. Чередникова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія "Проблеми моделювання та автоматизації проектування" (МАП-2008). Випуск 7(150). – Донецьк: ДонНТУ. – 2008. – 290 с.
8. Паршаков Б.П., Бикчентай Р.Н., Романов Б.А. Термодинамика и теплопередача (в технологических процессах нефтяной и газовой промышленности). Учебник для вузов. – М. : Недра, 1987.
9. Байкова Л.Р. Прогнозирование технологических параметров нефтепроводов в усложненных условиях эксплуатации. Дис. ... канд. техн. наук. Уфа. 1997. 201 с.
10. Ким Д.П., Рахматуллин Ш.И. О тепловом расчете магистральных нефтепроводов // Нефтяное хозяйство. 2006. № 1. С. 104-105.
11. Рудничная вентиляция: Справочник / Н.Ф. Гращенков, А.Э. Петросян, М.А. Фролов и др.; Под ред. К.З. Ушакова. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Недра, 1988, – 440 с: ил.

© С. А. Павлов, 2020