

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НА ОБЪЕКТАХ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА

METHODOLOGY FOR COMPREHENSIVE RELIABILITY ASSURANCE OF AIR DISTRIBUTION CONTROL SYSTEMS AT MINING FACILITIES

I. Bosikov,
candidate of technical sciences,
assistant professor,
North Caucasian Institute of mining and metallurgy (State
Technological University),
Vladikavkaz;

R. Klyuev,
doctor of technical sciences,
professor,
Moscow Polytechnic University,
Moscow.

The article discusses the method of air distribution control at the facilities of the mining complex, which allows for a comparative analysis of the main parameters of the ventilation network and the standard values provided for by the rules for the production and technical operation of mines. The purpose of the research is to develop a methodology for calculating the reliability of air distribution control in coal mines.

Keywords: reliability, air distribution, coal mine, mathematical models, static and dynamic characteristics, aerogas-dynamic processes.

Решение проблемы повышения эффективности управления воздухообеспечением может быть достигнуто путем рационального и своевременного перераспределения подаваемого в шахту воздуха, т.е. на основе управления проветриванием шахт. Управление проветриванием шахт позволит улучшить условия труда, повысить технику безопасности, увеличить добычу полезных ископаемых и уменьшить затраты энергии на проветривание.

Поставленные задачи решаются на основе исследования проблемы повышения эффективности технической системы горнодобывающего комплекса, и разработки методики расчета надежности управления воздухораспределением угольных шахтах.

Методология. Практической разработке алгоритма оптимального управления проветриванием шахты должны предшествовать всесторонние исследования специфических особенностей добычных участков с целью получения их математического описания [7, 9]. Последнее включает в себя статические и динамические характеристики объектов, т.е. зависимость между входными и выходными величинами [10, 17].

И.И. Босиков,
кандидат технических наук,
заведующий кафедрой,
Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет),
г. Владикавказ;

Р.В. Ключев,
доктор технических наук,
профессор,
Московский политехнический университет,
г. Москва.

Ключевые слова: надежность, воздухораспределение, угольная шахта, математические модели, статические и динамические характеристики, аэрогазодинамические процессы.

Обсуждение. При исследовании аэрогазодинамических процессов на добычном участке, как объекте управления, в качестве выходных величин выбирают обычно дебит метана q или концентрацию метана C , а в качестве входной величины — расход воздуха Q .

Эти величины по своей физической сущности являются случайными. Поэтому наиболее правильным является подход со статистической позиций к вопросу определения статических и динамических характеристик объектов проветривания по экспериментальным данным [8, 22]. Такой подход к определению статических характеристик добычных участков был применен в работе [5], в которой предложено описывать статическую характеристику $q=f(Q)$ линейной зависимостью, а характеристику $C=f(Q)$ — нелинейной (гиперболической) зависимостью. Надо отметить, что при определении экспериментальных статических характеристик необходимо сначала рассмотреть линейную зависимость и, лишь убедившись в ее недостаточной точности, переходить к нелинейным соотношениям.

Получение экспериментальных данных, необходимых для построения статических характеристик, связано с проведением на добычном участке специального эксперимента, нарушающего нормальный режим проветривания [2, 6]. Актуальным поэтому является исследование и разработка методов определения статических характеристик объектов проветривания [28, 29], по данным нормальной эксплуатации, которые могут быть получены без прерывания технологического процесса добычи полезного компонента [4].

Определение динамических характеристик объектов проветривания можно производить как аналитическими, так и экспериментальными методами. Первый из них состоит в получении на основе физики процесса упрощенных математических моделей динамики объектов проветривания. Относительная сложность получаемых при этом уравнений,

трудность определения в шахтных условиях входящих в них коэффициентов и неучет статистической природы объектов проветривания затрудняет использование и ограничивает область применения таких моделей.

В настоящее время для определения динамических характеристик аэрогазодинамических процессов [3, 19] наиболее целесообразно применять экспериментальные методы, делящиеся на активные и пассивные. Активный метод состоит в построении динамической модели объектов проветривания путем аппроксимации кривой переходного процесса, получаемой в результате специальных воздействий на объект проветривания, аналитическим выражением.

При получении динамических характеристик по данным нормальной эксплуатации можно использовать методы статистической динамики. Так как эти методы применимы только к чисто случайным процессам, то при исследовании аэрогазодинамических процессов необходима проверка этих условий. В противном случае получение по экспериментальным данным динамические характеристики объектов проветривания могут иметь количественные и качественные погрешности [15, 16].

Преодоление указанных трудностей может быть осуществлено путем применения разработанной методики [11, 12].

В этом случае заслуживают внимания и такие методы регуляризации, при использовании которых почти не требуются априорные сведения об объекте.

С течением времени появляются новые изменения и соответственно параметры лавах угольных шахт. Поэтому статические и динамические характеристики, полученные по экспериментальным реализациям процессов, быстро «стареют» и требуют периодической корректировки. Однако методы периодической корректировки математических моделей объектов проветривания в процессе диспетчерского контроля и управления практически не разработаны. Для этой цели могут быть использованы самонастраивающиеся или приспособляющиеся модели, при составлении которых обязательно должны быть учтены специфические особенности аэрогазодинамических процессов [13, 14].

В настоящей работе рассматриваются вопросы исследования добычных участков как объектов управления по газовому фактору, определения статических и динамических характеристик на основе статистических методов, структуры аэрогазодинамических процессов.

Вопросы математического описания объектов проветривания рассматриваются как по результатам активного эксперимента, так и по данным нормальной эксплуатации. При математическом описании добычных участков [18, 26] как объектов управления использованы достоверные экспериментальные данные, большая часть которых получена на многих добычных участках шахт.

Представим статическую характеристику объекта проветривания $C = f(Q)$ в виде:

$$C = C_0 + K_{CQ} Q, \quad (1)$$

где C_0 — постоянный коэффициент, % CH_4 ; K_{CQ} — коэффициент усиления объекта, который равен изменению концентрации метана при переходе из начального в новое установившееся состояние, вызванное единичным скачком расхода воздуха, % $\text{м}^3/\text{мин}$.

Для определения по экспериментальным данным коэффициентов статической характеристики (1) с помощью метода корреляционного анализа применяются следующие формулы:

$$K_{CQ} = \eta \cdot \frac{\sigma_C}{\sigma_Q} \quad (2)$$

$$C = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n C_{Qi} \quad (3)$$

$$Q = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Q_{Qi} \quad (4)$$

$$\sigma_C = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{Qi} - C)^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

$$\sigma_Q = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{Qi} - Q)^2 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

$$\eta_{CQ} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{Qi} - C) \cdot (Q_{Qi} - Q)}{(n-1) \cdot \sigma_C \cdot \sigma_Q} \quad (7)$$

На исследованных добычных участках шахт коэффициент C_0 меняется в диапазоне 0,55–2,25 % CH_4 со средним значением $C_p = 1,43$ % CH_4 , коэффициент K_{CQ} — в диапазоне — (0,35–2,41) · 10–3% мин/м³ со средним значением $K_{CQ} = -1,0 \cdot 10^{-3}$ % мин/м³. Значительный разброс коэффициентов статических характеристик объектов проветривания объясняется большим разнообразием показателей.

При определении коэффициентов статической характеристики (1) применяется небольшое число экспериментальных данных ($n = 3-8$). В теории математической статистики для выборки объемом $n < 50-100$ значений определение значимости коэффициентов корреляции рекомендуется производить по зависимости уровня значимости от выборочного коэффициента корреляции η . Используя эти зависимости, определено, что для добычных участков оценки коэффициентов корреляции с вероятностью $P = 0,99$ являются значимыми и лежат в диапазоне 0,9–0,95. Экспериментальные оценки коэффициентов корреляции весьма близки к единице, что свидетельствует о наличии достаточно сильной статистической связи между концентрацией метана и расходом воздуха в установившемся режиме [1, 30]. Иначе, одним из основных параметров, определяющих изменения концентрации метана на выходе объекта, является расход воздуха [5, 20].

Для проверки правильности выбора вида статической характеристики (1) воспользуемся следующим критерием: ошибка аппроксимации экспериментальной статической характеристики выбранным видом уравнения должна быть одного порядка с погрешностью измерения исходных данных [24, 33].

Оценку точности аппроксимации экспериментальной статической характеристики выбранным видом уравнения произведем по относительной погрешности:

$$\varepsilon_m = \frac{C_2 - C}{C_3} 100\%, \quad (8)$$

где C — концентрации метана.

Относительная погрешность вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_c = \frac{\delta_c + \sigma_c}{C_3}, \quad (9)$$

где δ_c , σ_c – систематическая и среднеквадратичная ошибки метанометра, % CH_4 .

Величины относительной погрешности аппроксимации экспериментальной статической характеристики ε_m и относительной погрешности измерения ε_c практически совпадают. Таким образом, нелинейная статическая характеристика $C = f(Q)$ в рабочем диапазоне изменений расхода воздуха может быть линеаризована, т.е. описана линейным уравнением.

Методика корреляционного анализа может быть использована для определения зависимости дебита метана от расхода воздуха установившемся режиме, т.е. статической характеристики $q = f(Q)$ для участка и лавы. Для нахождения значений дебита метана q используется формула:

$$C = \frac{q}{Q} \cdot 100\%. \quad (10)$$

Значения коэффициентов линейной статической характеристики:

$$q = q_0 + K_{qQ} \cdot Q. \quad (11)$$

Рассчитываются по формулам, аналогичным (1-7).

Для исследованных добычных участков шахт значение коэффициента q_0 находится в диапазоне 0,57-9,0 $\text{м}^3/\text{мин}$ со средним значением $q_0 = 3,4 \text{ м}^3/\text{мин}$, а значение коэффициента – в диапазоне $(2,1-9,0) \cdot 10^{-3}$ со средним значением $K_{qQ} = 4,34 \cdot 10^{-3}$ ($K_{qQ} > 0$).

Проверка показала, что оценки коэффициентов корреляции являются значимыми и что между дебитом метана и расходом воздуха в установившемся режиме существует тесная статистическая связь [21, 23].

Величины относительной погрешности аппроксимации статической характеристики $q = f(Q)$ линейным уравнением не превосходят для лавы и участка $\varepsilon_m = 7-20\%$.

Для определения погрешности вычисления дебита метана по формуле (10) выразим относительную ошибку определения дебита метана ε_q через относительные погрешности измерения концентрации метана ε_c и расхода воздуха ε_Q . Для этого, используем формулу (10), запишем:

$$q + \sigma_q = 0,01 \cdot (C + \sigma_C) \cdot (Q + \sigma_Q). \quad (12)$$

Переходя в выражении (12) к величинам среднеквадратичной погрешности, получим:

$$\sigma_q = 0,01 \cdot (C\sigma_Q + Q\sigma_C + \sigma_C\sigma_Q). \quad (13)$$

Разделив выражение (13) на величину Q , приведем его к окончательному виду:

$$\varepsilon_q = \varepsilon_c + \varepsilon_Q + 0,01 \varepsilon_c \varepsilon_Q, \quad (14)$$

где:

$$\sigma_q = \sigma_Q/q \cdot 100\%, \varepsilon_c = \sigma_C/C \cdot 100\%, \varepsilon_Q = \sigma_Q/Q \cdot 100\%. \quad (15)$$

Ошибка измерения расхода воздуха при использовании наиболее распространенных крыльчатых анемометров не превосходит $\varepsilon_Q = 10\% / 10^4$. Подставляя значение ε_Q и вышеприведенное значение ε_c в формулу (14), получим значение относительной погрешности $\varepsilon_q = 15 + 20\%$, которое практически совпадает со значением ε_m .

Таким образом, на основании применения предложенного критерия для оценки правильности выбора вида статической характеристики установлено, что статическая характеристика $q = f(Q)$ в рабочем диапазоне (200-2000 $\text{м}^3/\text{мин}$) изменения расхода воздуха может быть описана линейной зависимостью.

Следует отметить, что уравнения (2) и (11), хотя и носят эмпирический характер, но дают достаточно точное для инженерных расчетов математическое описание зависимостей $C = f(Q)$ и $q = f(Q)$ установившегося режима работы.

Статические характеристики объекта управления можно определить по экспериментальным данным нормальной эксплуатации [25, 27].

В нормальном режиме эксплуатации колебания расхода воздуха от среднего значения невелики, поэтому нелинейную статическую характеристику $C = f(Q)$ можно линеаризовать, т.е. описать уравнением (1).

Рассмотрим возможность применения стандартной методики корреляционного анализа, описанной выше, для определения коэффициентов статической характеристики (1) по данным нормальной эксплуатации [31, 32]. В этом случае для обеспечения независимости наблюдений процессов $C(t)$ и $Q(t)$, имеющих нормальное распределение, интервал замеров Δt надо выбирать большим, чем максимальное время интервала корреляции τ_0 , т.е. $\Delta t > \max \tau_0$.

По полученным с учетом интервалов корреляции независимым данным были найдены по формуле (7) оценки нормированного коэффициента корреляции τ_{CQ} . Так как число используемых данных не превышает нескольких десятков, была проведена проверка значимости полученных оценок τ_{CQ} путем определения истинного коэффициента корреляции τ_H . Значения n , и τ_{CQ} , τ_H для 3-х добычных участков приведены в таблице 1. По этим данным с вероятностью $P = 0,99$ можно утверждать, что значения нормированного коэффициента корреляции τ_{CQ} , найденные стандартным методом корреляционного анализа, для рассмотренных добычных участков является незначимыми.

Чтобы получить значимые коэффициенты корреляции необходимо увеличить число независимых данных, т.е. длину используемых реализаций. При значительных интервалах корреляции, которые достигают значений $\tau_0 = 3-5$ час, требуемый интервал наблюдения должен быть не менее 15-20 дней. На практике получение реализаций такой длительности связано с большими трудностями. Обычно ограничиваются более короткими реализациями длиной 5-10 суток. Но в этом случае, как показано выше, общепринятая методика корреляционного анализа не может быть использована для построения статических характеристик по данным нормальной эксплуатации [34, 35].

Для определения статических характеристик по данным нормальной эксплуатации при ограниченном интервале на-

Таблица 1

Сравнительная характеристика стандартного метода корреляционного анализа и модифицированной методики.

№ п/п	Объект наблюдения	Стандартный метод корреляционного анализа			Модифицированная методика корреляционного анализа		
		n	τ_{ca}	τ_H	N	τ_{ca}	τ_H
1	Шахта 15 бис	50	-0,214	-0,25	304	-0,131	-0,11
2	Шахта 31 бис	17	0,011	-0,47	405	-0,276	-0,09
3	Шахта 57	22	-0,39	-0,42	267	-0,96	-0,18
4	Шахта 58	23	-0,24	-0,41	421	-0,15	-0,09

блюдения (5-10 суток) предложена модифицированная методика корреляционного анализа.

В предложенной методике в качестве исходных данных используются зависимые результаты наблюдений. В работах [15, 16] теоретически обоснована возможность получения надежных оценок коэффициентов корреляции по зависимым данным при больших объемах выборки.

В соответствии с предложенной методикой определяют оценки следующих характеристик:

1) математическое ожидание:

$$X'_n = \frac{1}{n'} \cdot \sum_{i=1}^k X_i \cdot v_i(x) \quad (16)$$

$$Y'_n = \frac{1}{n'} \cdot \sum_{j=1}^k Y_j \cdot v_j(y); \quad (17)$$

2) дисперсия:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n'-1} \sum_{i=1}^k (X_i - X'_n)^2 \cdot v_i(x) - \frac{\Delta x^2}{12} \quad (18)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{n'-1} \sum_{j=1}^k (Y_j - Y'_n)^2 \cdot v_j(y) - \frac{\Delta y^2}{12}; \quad (19)$$

3) коэффициент корреляции:

$$\tau_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X'_n) \cdot (Y_j - Y'_n) \cdot v_j(x, y)}{(n'-1) \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y}. \quad (20)$$

Значения коэффициентов корреляции τ_{CQ} найденные по модифицированной методике корреляционного анализа и вычисленные с вероятностью $P = 0,99$ значимые коэффициенты корреляции $\tau_H(o)$ приведены в таблице 1. Сравнение их показывает, что при использовании модифицированной методики оценки τ_{CQ} являются значимыми. По этим оценкам с помощью формул (3) в (4) определяются коэффициенты C_0 и K_{CQ} статической характеристики объекта.

Небольшие значения коэффициентов корреляции τ_{CQ} полученные при обработке зависимых данных нормальной эксплуатации, объясняются влиянием динамических свойств объектов проветривания. Влияние динамики на статические

свойства объекта проявляется в увеличении «корреляционного поля», что приводит, с одной стороны, к уменьшению коэффициента корреляции, а с другой стороны, к росту дисперсии выходного процесса. Но так как коэффициент усиления объекта K_{CQ} согласно формуле (4) прямо пропорционален произведению величин $\tau_{CQ} \cdot \sigma_c$ которых первая под влиянием динамики уменьшается, а вторая — увеличивается, то погрешности вычисления коэффициента K_{CQ} по модифицированной методике корреляционного анализа относительно невелики. Экспериментальная проверка показала, что максимальная относительная ошибка ε_m при определении концентрации метана по статической характеристике, построенной с помощью модифицированной методики, не превосходит 10 %.

Величина погрешности ε_m определялась путем сравнения статической характеристики, полученной по модифицированной методике корреляционного анализа, с точной статической характеристикой объекта проветривания. Последняя была найдена с учетом динамических свойств объекта и аддитивной структуры аэрогазодинамических процессов.

Небольшие значения относительной погрешности ε_m свидетельствуют о возможности и целесообразности использования модифицированной методики корреляционного анализа для построения статической характеристики объекта проветривания по случайным процессам концентрации метана и расхода воздуха, полученным при нормальной эксплуатации участка.

Статические характеристики $C = f(Q)$ и $q = f(Q)$ находят широкое применение для определения математических ожиданий концентрации и дебита метана добычных участков, при моделировании объектов проветривания на вычислительных машинах и при анализе и синтезе систем управления проветриванием шахт.

Выводы.

Показано, что общепринятый метод корреляционного анализа, основанный на использовании данных независимых наблюдений, не может быть применен для определения статических характеристик объектов проветривания по данным нормальной эксплуатации, полученным на ограниченном интервале времени (5-10 суток).

Рассмотрены основные типы газодинамических производственных процессов при добыче полезных ископаемых, для которых получено соответствующее аналитико-математическое описание. На основании описания разработана методика, позволяющая произвести варьирование различных режимов проветривания шахт и дать характеристику динамических свойств участков добычи. При этом важным является получение обобщенного выражения, включающего передаточные функции вентиляционных объектов горнодобывающего комплекса. Значимость проведенных экспериментальных исследований подтверждается возможностью применения дифференциальных уравнений для анализа линеаризованных динамических характеристик вентиляционных режимов участков добычи полезного компонента, содержащих концентрацию метана в форме «всплеска». ■

Авторы выражают признательность Д.Г. Петракову за помощь и поддержку в организационной, исследовательской и экспериментальной работах на исследуемых участках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизированное управление вентиляцией шахт и рудников. Проблемы, современный опыт, направления совершенствования / М.А. Семин, Е.Л. Гришин, Л.Ю. Левин, А.В. Зайцев // Записки Горного института 2020. Т.246. С.623-632. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4.
2. Бахвалов Л.А. Анализ современных систем автоматического управления проветриванием / Л.А. Бахвалов, И.В. Баранникова, А.Т. Агабаев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 7. С. 22-28. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-7-0-22-28.
3. Гендлер С.Г. Управление аэродинамическими процессами при разработке золоторудных месторождений открытым способом / С.Г. Гендлер, И.А. Борисовский // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 2. С. 99-107. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-99-107.
4. Гурин А.А. Повышение безопасности работы систем аспирации и вентиляции путем очистки воздухопроводов / А.А. Гурин, В.А. Шаповалов, В.И. Ляшенко // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 1. С. 40-45. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-1-40-45.
5. Достижения науки и техники в области вентиляции шахт за последние 10 лет / И.В. Баклушина, Новикова К.Ю., В.В. Астрашенко, М.Н. Налимов, М.С. Шкурят // Тенденции развития науки и образования. 2021. № 75-2. С. 102-105. DOI: 10.18411/lj-07-2021-58.
6. Комплексный анализ и оценка перспективных золоторудных зон с применением современных геофизических методов / И.И. Босиков, Р.В. Ключев, В.Х. Тавасиев, Н.Н. Летичевская // Геология и геофизика Юга России. 2021. №11(4): С.94-108. DOI: 10.46698/VNC.2021.42.89.008.
7. Лисаков С.А. Моделирование запыленности в тупиковой выработке угольной шахты / С.А. Лисаков, А.И. Сидоренко, Е.В. Сыпин // Южно-Сибирский научный вестник. 2019. №4-1(28). С. 200-213. DOI: 10.25699/SSSB.2019.28.46375.
8. Николаев А.В. Управление системой проветривания подземных горнодобывающих предприятий в аварийных ситуациях / А.В. Николаев, Г.Б. Лялькина // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019. № 5(135). С. 37-46. DOI: 10.26730/1999-4125-2019-5-37-46.
9. Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников / Б.П. Казаков, Е.В. Колесов, Е.В. Накаряков, А.Г. Исаевич // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 6. С. 5-33. DOI: 10.25018/0236-1493_2021_6_0_5.
10. Опыт внедрения систем динамического управления проветриванием рудников / Е.Л. Гришин, Е.В. Накаряков, Н.А. Трушкова, А.Н. Санникович // Горный журнал. 2018. № 6. С. 103-108. DOI: 10.17580/gzh.2018.08.15.
11. Оценка и анализ аэродинамических параметров воздушных потоков для эффективного выбора схем воздухообеспечения в угольных шахтах / И.И. Босиков, Р.В. Ключев, И.О. Аймбетова, С.А. Махосева // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. № 3. С. 397-405. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-397-405.
12. Оценка управления проветриванием угольных шахт с помощью методов статистической динамики / И.И. Босиков, Р.В. Ключев, И.М. Ажмухамедов, В.Ч. Ревазов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. №11. С.123-135. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_123.
13. Оценка эксплуатационной надежности электроснабжения развивающихся участков добычи руд на высокогорном руднике / Р.В. Ключев, И.И. Босиков, О.А. Гаврина, В.И. Ляшенко // Горные науки и технологии. 2021. № 6(3). С.211-220. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-3-211-220.
14. Повышение безопасности и эффективности электроснабжения участков добычи руд на высокогорном руднике / Р.В. Ключев, И.И. Босиков, О.А. Гаврина, В.И. Ляшенко // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 1. С. 7-13. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-1-7-13.
15. Разработка методов и средств управления аэрогазодинамическими процессами на добычных участках / И.И. Босиков, Р.В. Ключев, В.Н. Хетагуров, И.М. Ажмухамедов // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. № 1. С. 77-83. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83.
16. Achieving energy efficiency with medium voltage variable speed drives for ventilation-on-demand in South African mines / A.J. H.Nel, D.C. Arndt, J.C. Vosloo, M.J. Mathews // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol.232. P.379-390. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.05.376.
17. Acuña E.I. A Review of Primary Mine Ventilation System Optimization / E.I. Acuña, I.S. Lowndes // Interfaces. 2014. Vol. 44. Iss. 2. P. 163-175. DOI:10.1287/inte.2014.0736.
18. Analysis of gateroad stability at two longwall mines based on field monitoring results and numerical model analysis / G.S. Esterhuizen, D.F. Gearhart, T. Klemetti, H. Dougherty, M. Dyke // International Journal of Mining Science and Technology. 2019. Vol. 29. Issue 1. P. 35-43. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.11.021.
19. Brodny J. Applying computational fluid dynamics in research on ventilation safety during underground hard coal mining: A systematic literature review / J. Brodny, M. Tutak // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 151. P.373-400. DOI: 10.1016/j.psep.2021.05.029.
20. Chatterjee A. Optimization of mine ventilation fan speeds according to ventilation on demand and time of use tariff / A. Chatterjee, L. Zhang, X. Xia / Applied Energy, 2015, Vol. 164. P.65-73. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.01.134.
21. Cheng L. Evolutionary model of coal mine safety system based on multi-agent modeling / L. Cheng, H. Guo, H. Lin // Process Safety and Environmental Protection. 2021.Vol. 147. P. 1193-1200. DOI: 10.1016/j.psep.2021.01.046.
22. Intelligent safety adjustment of branch airflow volume during ventilation-on-demand changes in coal mines / K. Wang, Sh. Jiang, Zh. Wu, H. Shao, W. Zhang, X. Pei, Ch. Cui // Process Safety and Environmental Protection. 2017. Vol. 111. P.491-506. DOI: 10.1016/j.psep.2017.08.024.
23. Li G. Sensitivity analysis on parameter changes in underground mine ventilation systems / G. Li, C. Kocsis, S. Hardcastle // Journal of Coal Science and Engineering (China). 2011. Vol. 17. No 3. P.251-255. DOI:10.1007/s12404-011-0305-z.
24. Lowndes I.S. The application of genetic algorithms to optimize the performance of a mine ventilation network: The influence of coding method and population size / I.S. Lowndes, T. Fogarty, Z.Y. Yang // Soft Computing. 2005. Vol. 9. No 7. P. 493-506. DOI 10.1007/s00500-004-0364-9.
25. Qiao W. Analysis and measurement of multifactor risk in underground coal mine accidents based on coupling theory // Reliability Engineering & System Safety. 2021. Vol. 208. №107433. DOI: 10.1016/j.res.2021.107433.

26. McPherson M.J. Subsurface ventilation engineering. Fresno, California: Mine Ventilation Services Inc., 2009. 905 p. DOI: 10.1007/978-94-011-1550-6.
27. Models of methane behaviour in auxiliary ventilation of underground coal mining / J. Toraño, S. Torno, M. Menendez, M. Gent, J. Velasco / International Journal of Coal Geology. 2009. Vol. 80. Issue 1. P. 35-43. DOI: 10.1016/j.coal.2009.07.008.
28. Optimization of air quantity regulation in mine ventilation networks using the improved differential evolution algorithm and critical path method / K. Chen, J. Si, F. Zhou, R. Zhang, H. Shao, H. Zhao // International Journal of Mining Science and Technology. 2015. Vol. 25. Issue 1. P. 79-84. DOI: 10.1016/j.ijmst.2014.11.001.
29. Optimized model-based control of main mine ventilation air flows with minimized energy consumption / S. Sjöström, E. Klintenös, P. Johansson, J. Nyqvist // International Journal of Mining Science and Technology. 2020. Vol. 30. Issue 4. P. 533-539. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.05.016.
30. Remote characterization of ventilation systems using tracer gas and CFD in an underground mine / G. Xu, E.C. Jong, K.D. Luxbacher, S.A. Ragab, M.E. Karmis, Safety Science. 2015. Vol. 74. P. 140-149. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.01.004.
31. Researches and applications on geostatistical simulation and laboratory modeling of mine ventilation network and gas drainage zone / Z. Haoran, L.S. Pera, Y. Zhao, C.V. Sanchez / Process Safety and Environmental Protection. 2015. Vol. 94. P. 55-64. DOI: 10.1016/j.psep.2014.10.003.
32. Saki S.A. Optimization of gob ventilation boreholes design in longwall mining / S.A. Saki, J.F. Brune, M.U. Khan // International Journal of Mining Science and Technology. 2020. Vol. 30. Issue 6. P. 811-817. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.08.005.
33. Semin M.A. Stability of air flows in mine ventilation networks / M.A. Semin, L.Yu. Levin // Process Safety and Environmental Protection, 2019, Vol. 124, pp. 167-171. DOI: 10.1016/j.psep.2019.02.006.
34. Thakur P. 1 - Underground Coal Mine Atmosphere. Advanced Mine Ventilation // Respirable Coal Dust, Combustible Gas and Mine Fire Control. 2019. P. 3-16. DOI: 10.1016/B978-0-08-100457-9.00001-8.
35. Wallace K. The practice of mine ventilation engineering / K. Wallace, B. Prosser, J.D. Stinnette // International Journal of Mining Science and Technology. 2015. Vol. 25. Iss. 2. P. 165-169. DOI:10.1016/j.ijmst.2015.02.001.



РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА ИМЕНИ И.М. ГУБКИНА

Информируем Вас

Свою непосредственную историю Губкинский университет ведет от нефтяного факультета Московской Горной Академии, созданной по Декрету ВСНХ от 4 сентября 1918 г. В 1920 г. на должность профессора Академии был принят Иван Михайлович Губкина, а в 1922 г. он стал ее ректором. За 20-е гг. им было приложено много сил для начала формирования в стенах Академии высшего нефтяного образования.

В конце 20-х гг., когда страна вступила в период форсированной индустриализации, возникла острая потребность нефтяной промышленности в квалифицированных кадрах. В связи с этим 17 апреля 1930 г. Президиумом ВСНХ было принято решение расформировать Московскую Горную Академию имени т. Сталина и на ее основе создать шесть высших технических учебных заведений, в том числе – Московский нефтяной институт. Учитывая огромные заслуги академика Губкина в деле организации высшей школы по подготовке кадров для нефтяной промышленности, институту было присвоено имя Ивана Михайловича Губкина, а сам он был назначен первым его директором.

Факультеты:

- ◆ Факультет геологии и геофизики нефти и газа,
- ◆ Факультет разработки нефтяных и газовых месторождений,
- ◆ Факультет проектирования, сооружения и эксплуатации систем трубопроводного транспорта,
- ◆ Факультет инженерной механики,
- ◆ Факультет химической технологии и экологии, и др.

Контакты : 119991, г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1
+7 (499) 507-88-88
com@gubkin.ru




WWW.N-GN.RU