

УДК 622.42:519.21

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2018

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ОБЩЕРУДНИЧНОЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ ТЯГИ С ЗАДАННОЙ ДОВЕРИТЕЛЬНОЙ ВЕРОЯТНОСТЬЮ

Г.Б. Лялькина, А.В. Николаев, Н.С. Макарычев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
(614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)

METHOD OF CALCULATION OF VOLUME AND DIRECTION OF GENERAL MINE NATURAL DRAFT WITH CONFIDENT PROBABILITY

Galina B. Lyalkina, Aleksandr V. Nikolaev, Nikita S. Makarychev

Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskiy av., Perm, 614990, Russian Federation)

Получена / Received: 23.08.2017. Принята / Accepted: 09.06.2018. Опубликовано / Published: 29.06.2018

Ключевые слова:

безопасность подземных работ, общерудничная естественная тяга, стохастическое моделирование, стохастическая культура.

Для обеспечения безопасных условий труда горнорабочих на подземных горнодобывающих предприятиях необходимо осуществлять проветривание подземных горных выработок с целью снижения в рабочих зонах концентрации вредных и опасных газов. Объемный расход воздуха, необходимый для функционирования рудника (шахты), определяется в соответствии с числом людей, находящихся одновременно в подземных горных выработках, а также в зависимости от интенсивности выделения ядовитых, горючих газов и пыли, минимальной скорости движения воздуха и других факторов, актуальных для конкретного горнодобывающего предприятия. В связи с этим для поддержания безопасных условий труда в рудник (шахту) в необходимом количестве должен поступать свежий воздух, количество которого определяется его потребностями.

Для подачи воздуха в рудник используется главная вентиляторная установка (ГВУ), за счет работы которой воздух по воздухоподающим стволам поступает в подземные горные выработки и удаляется по вентиляционному стволу (всасывающий способ проветривания).

Наряду с работой ГВУ между шахтными стволами действует общерудничная естественная тяга h_e , возникающая вследствие разности средних значений барометрического давления и температуры воздуха. Величина и направление общерудничной естественной тяги h_e оказывает влияние на работу ГВУ, увеличивая, если направление ее действия совпадает с требуемым направлением движения воздуха, либо снижая производительность Q_B ГВУ, если направление ее действия противоположно направлению общерудничной естественной тяги.

В настоящей работе представлена методика расчета величины общерудничной естественной тяги h_e с учетом возможного разброса ее значений из-за воздействия случайных обстоятельств, в том числе оказывающих влияние на величину аэродинамического сопротивления рудника.

Отмечена также необходимость формирования навыков стохастической культуры у студентов технических вузов при изучении методик обработки экспериментальных данных и построения моделей сложных технических объектов на их основе.

Key words:

underground work safety, general natural draft, stochastic modeling, stochastic culture.

In order to ensure safe working conditions of workers in underground mining, it is necessary to carry out ventilation of underground mining operations to reduce the concentration of harmful and dangerous gases in working areas. Volume air flow required for operation of a mine (shaft) is determined in accordance with a number of people being simultaneously in underground mining and based on intensity of the emission of toxic, combustible gases and dust, minimum air velocity and other factors relevant to a specific mining company. So, in order to maintain safe working conditions in the mine (shaft) fresh air must be supplied in required quantity determined by its needs.

A main fan is used to provide the mine with air. Through the supplying trunks, air enters underground mining and is removed by the ventilation shaft (suction method of ventilation).

Along with the main fan there is a general natural mine draft h_n , which occurs as a result of the difference in mean values of barometric pressure and air temperature. The magnitude and direction of the general natural draft h_n has an effect on the operation of the main fan. That increases if its direction of action coincides with the desired direction of air movement and decreases the performance of a main fan Q_F if the direction of its action is opposite to the direction of general mine draft.

The paper presents the method of calculating the value of general natural draft h_n taking into account the possible spread of its values due to the impact of the accidental circumstances, including those influencing the magnitude of the aerodynamic resistance of the mine.

The necessity of forming stochastic culture skills among students of technical universities is noted in studying methods of processing experimental data and constructing models of complex technical objects on their basis.

Лялькина Галина Борисовна – доктор физико-математических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности (тел.: +007 342 219 84 82, e-mail: bg@pstu.ru).

Николаев Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры горной электромеханики (тел.: +007 908 241 40 19, e-mail: nikolaev0811@mail.ru). Контактное лицо для переписки.

Макарычев Никита Сергеевич – студент кафедры горной электромеханики (тел.: +007 950 464 12 14, e-mail: nmakarychev@mail.ru).

Galina B. Lyalkina (Author ID in Scopus: 56989948300) – Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Department of Life Safety (tel.: +007 342 219 84 82, e-mail: bg@pstu.ru).

Aleksandr V. Nikolaev (Author ID in Scopus: 56988627700) – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Mining Electromechanics (tel.: +007 908 241 40 19, e-mail: nikolaev0811@mail.ru). The contact person for correspondence.

Nikita S. Makarychev – student at the Department of Mining Electromechanics (tel.: +007 950 464 12 14, e-mail: nmakarychev@mail.ru).

Введение

Расчет количества воздуха, необходимого для проветривания подземного горнодобывающего предприятия, в настоящее время определяется позабойным методом, когда необходимые объемные расходы свежего воздуха подсчитываются для каждого забоя, добычного участка, камеры служебного назначения, а затем эти объемы суммируются [1]. В этом случае объем необходимого количества воздуха рассчитывается на период отработки отдельного участка шахтного поля. Установленный в ходе расчетов объемный расход воздуха, подаваемого в рудник (шахту), может корректироваться по результатам проведенной воздушно-депресссионной съемки. При этом, согласно «Правилам безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [2], воздушно-депресссионную съемку необходимо проводить не реже 1 раза в 3 года. В остальное время какой-либо регулировки объемного расхода воздуха, подаваемого в подземную часть предприятия, не предусмотрено. Тем не менее известно, что влияние на этот объем оказывает общерудничная естественная тяга, которая может значительно изменяться ввиду изменения параметров воздушной среды в шахтных стволах.

Расчетам общерудничной естественной тяги посвящены многочисленные работы [1, 3–14]. В используемых в настоящее время методиках расчета общерудничной естественной тяги h_e необходимо измерять параметры наружного воздуха, воздуха в околоствольных дворах воздухоподающих стволов, в главных вентиляционных выработках, примыкающих к вентиляционному стволу, а также в канале главной вентиляционной установки (ГВУ) и в некоторых точках подземной части горнодобывающего предприятия. На проведение измерений, как правило, требуется от нескольких часов до нескольких дней [15]. За это время величина и направление общерудничной (общерудничной) естественной тяги h_e может многократно измениться, и ее влияние на объем подаваемого воздуха за этот период не будет учтено, что может привести к неоправданному повышению энергозатрат [16–18].

В работе [19] предлагается управлять режимом работы ГВУ при помощи сигналов с программируемого логического контроллера, в котором будет производиться расчет абсолютного значения общешахтной (общерудничной) естественной тяги h_e в зависимости от текущих показаний датчиков температуры и давления воздуха, расположенных в околоствольных дворах воздухоподающих стволов, в главных вентиляционных выработках, в канале ГВУ, а также снимающих показания на дневной поверхности. Однако необходимо учитывать, что система проветривания рудника (шахты) является *инерционной*. После изменения режима работы ГВУ изменяется объемный расход воздуха в ее канале, затем в вентиляционном стволе. И только через определенный промежуток времени изменится воздухораспределение в воздухоподающих стволах.

Следовательно, для управления режимом работы ГВУ необходимо учитывать изменение текущих параметров, определяющих значение общерудничной (общешахтной) естественной тяги h_e . Эти изменения зависят от множества случайных факторов, и способы ее расчета требуют использования методов математической статистики [20–26]. Кроме того, исходные опытные данные, на основе которых осуществляются расчеты, содержат неизбежные погрешности, и методика их получения допускает лишь вероятностную оценку точности. И потому при построении моделей на их основе необходимо, в частности, выполнять требования проверки их адекватности и границ доверительного интервала [27].

Описание методики расчета величины и направления общерудничной естественной тяги

Для определения величины и направления естественной тяги h_e воспользуемся методом, предложенным в работах [28, 29].

Указанный метод состоит в поиске экспериментальной зависимости статистического давления h_B , развиваемого ГВУ, от ее производительности Q_B , т.е. в поиске соответствующего уравнения регрессии.

Поиск соответствующего уравнения регрессии следует начинать с проверки существования корреляционной связи между фактором (квадратом производительности ГВУ Q_B^2) и функцией отклика (статического давления h_B).

На существование корреляционной связи указывает отличие коэффициента корреляции от нуля. Близость его к единице свидетельствует, что связь существенна (значима).

Уравнение регрессии предполагается линейным относительно координат (h_B ; Q_B^2):

$$h_B = h_e + R_{\text{руд}} Q_B^2 \quad (1)$$

Искомые коэффициенты уравнения – это $R_{\text{руд}}$ – аэродинамическое сопротивление рудника (шахты), $(\text{Н}\cdot\text{с}^2)/\text{м}^8$, и h_e – естественная тяга, Па.

Коэффициенты h_e и $R_{\text{руд}}$ ищутся из системы уравнений на основе метода наименьших квадратов [30]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n h_{B,i} - R_{\text{руд}} \sum_{i=1}^n Q_{B,i}^2 - h_e n = 0, \\ \sum_{i=1}^n h_{B,i} Q_{B,i}^2 - R_{\text{руд}} \sum_{i=1}^n Q_{B,i}^4 - h_e \sum_{i=1}^n Q_{B,i}^2 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

и вычисляются по следующим формулам:

$$R_{\text{руд}} = \frac{\overline{Q_B^2 h_B} - \overline{Q_B^2} \overline{h_B}}{\overline{Q_B^4} - (\overline{Q_B^2})^2} \quad (3)$$

и

$$h_e = \overline{h_B} - R_{\text{руд}} \overline{Q_B^2}. \quad (4)$$

Черта над каждой из переменных величин означает ее среднее значение, вычисляемое по опытными данным.

Ниже представлена методика расчета естественной тяги h_e по опытными данным при заданном уровне значимости. Методика состоит из нескольких этапов:

I этап. Оценка значимости коэффициента линейной корреляции $r_{Q_B^2 h_B}^{\text{оп}}$ выполняется следующим образом.

1. Оцениваем коэффициент корреляции по формуле

$$r_{Q_B^2 h_B}^{\text{оп}} = \frac{\overline{Q_B^2 h_B} - \overline{Q_B^2} \overline{h_B}}{\sqrt{((\overline{Q_B^4}) - (\overline{Q_B^2})^2)((\overline{h_B^2}) - (\overline{h_B})^2)}}. \quad (5)$$

Модуль полученного значения сравнивают с единицей следующим образом.

Если $|r_{Q_B^2 h_B}^{\text{оп}}| \approx 1$, то существует линейная корреляционная связь между Q_B^2 и h_B и есть смысл вычислять h_e .

Если $|r_{Q_B^2 h_B}^{\text{оп}}| \ll 1$, то линейная корреляционная связь между Q_B^2 и h_B отсутствует, и тогда необходимо искать коэффициент детерминации $D_{Q_B^2 h_B} = (r_{Q_B^2 h_B}^{\text{оп}})^2$, показывающий, на сколько процентов уравнение регрессии объясняет зависимость функции отклика от рассматриваемых факторов.

2. Проверяем значимость коэффициента линейной корреляции с помощью t -критерия Стьюдента.

С этой целью определяем опытное значение t -критерия Стьюдента для коэффициента корреляции $r_{Q_B^2 h_B}^{\text{оп}}$ по формуле

$$t_{r_{Q_B^2 h_B}^{\text{оп}}} = \sqrt{\frac{(n-2)(r_{Q_B^2 h_B}^{\text{оп}})^2}{1 - (r_{Q_B^2 h_B}^{\text{оп}})^2}}. \quad (6)$$

Далее задаем уровень значимости α и определяем критическое значение t -критерия Стьюдента $t_{\alpha}^{\text{кр}} = t(\alpha; n - 2)$, которое ищется в статистических таблицах, при числе свободы $n - 2$, и где n – объем выборочной совокупности опытных данных.

Если $t_{r_{Q_B^2 h_B}^{\text{оп}}} < t_{\alpha}^{\text{кр}}$, то коэффициент линейной корреляции $r_{Q_B^2 h_B}^{\text{оп}}$ не значим, и его следует принять равным нулю. Это означает, что с вероятностью $p = 1 - \alpha$ между величинами Q_B^2 и h_B линейная связь отсутствует.

Если $t_{r_{Q_B^2 h_B}^{\text{оп}}} > t_{\alpha}^{\text{кр}}$, то коэффициент линейной корреляции $r_{Q_B^2 h_B}^{\text{оп}}$ значим. Это означает, что с вероятностью $p = 1 - \alpha$ между величинами Q_B^2 и h_B существует линейная связь, следовательно, можно приступить к линейному регрессионному анализу.

II этап. Вычисление коэффициентов h_e и $R_{\text{руд}}$ уравнения регрессии выполняется по формулам (3), (4).

В случае если значение общерудничной естественной тяги h_e будет положительным, т.е. оба конца доверительного интервала будут лежать в положительной области, то она будет препятствовать проветриванию. В противном случае, когда значения доверительного

интервала находятся в отрицательной области, общерудничная естественная тяга h_e будет способствовать работе ГВУ [28]. Для оценки величины и направления общерудничной естественной тяги h_e будет необходим следующий этап.

III этап. Проверка значимости расчетного значения h_e и оценка величины соответствующего доверительного интервала при заданном уровне значимости α .

С этой целью вычислим опытное значение критерия Стьюдента $t_{h_e}^{оп}$ через стандартную ошибку m_{h_e} параметра h_e по следующим формулам [20, 21, 29]:

$$t_{h_e}^{оп} = \frac{h_e}{m_{h_e}},$$

$$m_{h_e} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{Bi} - R_{руд} Q_{Bi}^2 - h_e)^2}{(n-2)n} \frac{\sum_{i=1}^n Q_{Bi}^4}{\sum_{i=1}^n (Q_{Bi}^2 - \overline{Q_B^2})^2}}. \quad (7)$$

Тогда возможны два варианта.

Если $t_{h_e}^{оп} < t_{\alpha}^{кр}$, то естественная тяга h_e не значима, и ее принимают равной нулю.

Если $t_{h_e}^{оп} > t_{\alpha}^{кр}$, то естественная тяга h_e значима. Следовательно, значение естественной тяги h_e будет лежать в доверительном интервале с вероятностью $p = 1 - \alpha$, границы которого определяются по следующей формуле:

$$h_e \in (h_e - m_{h_e} t_{\alpha}^{кр}(\alpha; n-2); h_e + m_{h_e} t_{\alpha}^{кр}(\alpha; n-2)). \quad (8)$$

Проиллюстрируем методику расчета на трех примерах по результатам измерений, выполненных на одном из калийных рудников Пермского края.

В ходе эксперимента изменялась производительность Q_B ГВУ путем изменения угла установки лопаток осевого направляющего аппарата вентилятора. Опытные значения были определены при помощи расходомера, расположенного в нагнетательном (диффузионном) канале [28, 31].

Изменение статического давления h_B , развиваемого ГВУ, определялось при помощи приборов (микробарометров), расположенных в нагнетательном и во всасывающем (в канале ГВУ) каналах [28, 29].

Результаты обработки данных по описанной методике расчета

Результаты обработки данных для трех опытных серий А1, А2, А3.

Серия А1. Ниже представлены значения статического давления h_B , развиваемого ГВУ в зависимости от ее производительности Q_B (серия А1):

Q_B , м ³ /с	219,9	230,1	264,3	282,1	299,5	312,6	330,5	367,1
h_B , Па	1992,11	2241,62	2770,53	3340,14	3751,55	4126,36	4296,87	5449,18

Приведем результаты расчета.

Выполним оценку значимости коэффициента линейной корреляции $r^{оп}$.

Значение коэффициента корреляции $r^{оп}$, полученное по формуле (5), $r^{оп} = 0,99 \approx 1$. Близость коэффициента корреляции к единице означает, что между Q_B^2 и h_B существует линейная корреляционная связь.

Подставляя данные в формулы (3) и (4), получаем следующие значения естественной тяги и аэродинамического сопротивления рудника: $h_e = 115,22$ Па, $R_{руд} = 0,0396$ (Н·с²)/м⁸.

Величина естественной тяги h_e найдена в результате обработки статистических данных, поэтому следует подтвердить правильность расчета (в данном случае – незначимость величины h_e) с помощью критерия Стьюдента.

По формуле (7) получаем, что расчетное значение коэффициента Стьюдента для величины естественной тяги намного меньше его критического значения: $t_{h_e}^{оп} = 0,93 \ll 2,45 = t_{\alpha}^{кр} = t(0,05; 6)$, что подтверждает незначимость коэффициента величины естественной тяги h_e . Поэтому можно считать, что с вероятностью 95 % в момент измерений естественная тяга h_e отсутствовала ($h_e = 0$). Оценим границы доверительного интервала полученного значения h_e по формуле (8). В данном случае границы доверительного интервала имеют разные знаки, что подтверждает близость естественной тяги к нулю:

$$h_e \in (115,22 - 123,98 \cdot 2,45; 115,22 + 123,98 \cdot 2,45) \equiv (-188,53; 418,98).$$

Отметим, что если объем n выборочной совокупности опытных данных мал, то, как правило, стандартная ошибка велика, что приводит

к растягиванию доверительного интервала и возможным последующим ошибкам в выводах.

Доверительный интервал позволяет определить направление общерудничной естественной тяги. А именно, если обе границы интервала (8) имеют знак «←», то значение общерудничной естественной тяги отрицательно, а знак «+» на обеих границах интервала указывает на то, что значение тяги положительно. Исходя из этого, если обе границы (8) отрицательны, то с вероятностью $p = 1 - \alpha$ направления действия общерудничной естественной тяги и ГВУ будут совпадать, т.е. тяга будет способствовать естественному проветриванию рудника (шахты). Положительность границ интервала (8) указывает на то, что направления действия естественной тяги и ГВУ будут противоположными, т.е. тяга будет препятствовать поступлению воздуха в рудник.

Приведем соответствующие примеры.

Серия А2. Ниже представлены результаты измерений статического давления h_B , развиваемого ГВУ, в зависимости от ее производительности Q_B , полученные во второй серии измерений:

Q_B , м ³ /с	219,9	230,1	264,3	282,1	299,5	312,6	330,5	367,1
h_B , Па	1193,52	1454,73	2121,54	2381,15	2792,56	3191,47	3771,87	4822,48

Выполним оценку значимости коэффициента линейной корреляции $r^{оп}$:

По формуле (5) значение коэффициента корреляции $r^{оп} = 0,99 \approx 1$. Близость коэффициента корреляции к единице означает, что между Q_B^2 и h_B существует линейная корреляционная связь.

Подставляя данные из таблицы в формулы (3) и (4), получаем, соответственно, значения естественной тяги и аэродинамического сопротивления рудника: $h_e = -822,55$ Па, $R_{руд} = 0,0415$ (Н·с²)/м⁸.

По формуле (7) расчетное значение коэффициента Стьюдента для величины естественной тяги значительно превышает его критическое значение: $t_{h_e}^{оп} = 8,85 \gg 2,45 = t_{\alpha}^{кр} = t(0,05; 6)$, что подтверждает значимость величины естественной тяги h_e . Значение естественной тяги отрицательно, и с вероятностью 95 % ее величина располагается в доверительном интервале

$$h_e \in (-822,55 - 92,93 \cdot 2,45; -822,55 + 92,93 \cdot 2,45) \equiv (-1050,24; -594,87).$$

Таким образом, расчет показывает, что с вероятностью 95 % в момент измерений значение

естественной тяги h_e отрицательно, т.е. тяга способствует поступлению воздуха в рудник. В целях экономии энергии в рассматриваемом случае рекомендуется снизить производительность ГВУ на величину $\Delta h_e = 594,87$ Па (т.е. до верхней границы доверительного интервала). Ориентироваться в данном случае на среднее значение доверительного интервала, т.е. на значение $h_e = 822,55$ Па, не рекомендуется, поскольку величина естественной тяги h_e с вероятностью 0,95 может принимать любое значение в границах доверительного интервала и при изменении производительности ГВУ на величину $\Delta h_e = 822,55$ Па объема поступающего в рудник воздуха может оказаться недостаточно для обеспечения условий подачи воздуха в требуемом объеме. Еще хуже может оказаться ситуация, когда производительность ГВУ попытаемся снизить на величину $h_e = 1050,24$ Па.

Ниже в таблице представлены значения статического давления h_B , развиваемого ГВУ, в зависимости от ее производительности Q_B (серия А3):

Q_B , м ³ /с	219,9	230,1	264,3	282,1	299,5	312,6	330,5	367,1
h_B , Па	2994,25	3151,88	4121,52	4511,23	4942,14	5128,58	5791,27	6611,91

Выполним оценку значимости коэффициента линейной корреляции $r^{оп}$.

По формуле (5) значение коэффициента корреляции $r^{оп} = 0,954 \approx 1$. Близость коэффициента корреляции к единице означает, что между Q_B^2 и h_B существует линейная корреляционная связь.

Подставляя данные из таблицы в формулы (3) и (4), получаем соответствующие значения естественной тяги и аэродинамического сопротивления рудника: $h_e = 1026,2$ Па, $R_{руд} = 0,0426$ (Н·с²)/м⁸ (отметим, что значение естественной тяги положительно, $h_e > 0$).

При этом по формуле (7) получаем, что расчетное значение коэффициента Стьюдента для величины естественной тяги намного больше его критического значения: $t_{h_e}^{оп} = 6,88 \gg 2,45 = t_{\alpha}^{кр} = t(0,05; 6)$, это подтверждает, что величина естественной тяги h_e значима. В рассматриваемом случае обе границы доверительного интервала для естественной тяги h_e положительны:

$$h_e \in (1026,2 - 149,12 \cdot 2,45; 1026,2 + 149,12 \cdot 2,45) \equiv (660,86; 1391,55).$$

Таким образом, в момент измерений естественная тяга h_e препятствует поступлению воздуха в рудник, что указывает на необходимость увеличения производительности ГВУ (для компенсации действия естественной тяги в рассмотренном примере – минимум на 1391,55 Па).

Еще раз подчеркнем, что для прогнозирования поведения сложных технических систем исследователю постоянно приходится учитывать влияние множества факторов и неточность исходных данных, и потому доверять полученным результатам эксперимента и моделям на их основе можно только с определенной долей вероятности. В связи с этими обстоятельствами обработка опытных данных требует от исследователя определенного уровня владения навыками стохастической культуры [27]. И потому в заключение обратим внимание на

необходимость формирования навыков стохастической культуры у студентов технических вузов при изучении методик обработки экспериментальных данных и построения моделей сложных технических объектов на их основе.

Выводы

Представленная методика расчета общерудничной естественной тяги позволяет выявить ее наличие и определить направление с заданной доверительной вероятностью. Выполненные расчеты позволяют управлять работой ГВУ, внося оперативные изменения с целью обеспечения эффективного проветривания. Разработанная методика расчетов может служить учебной моделью при обучении студентов направления «Горное дело» по дисциплинам «Безопасность ведения горных работ» и «Автоматизация управления горных работ».

Библиографический список

1. Мохирев Н.Н., Радько В.В. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2007. – 324 с.
2. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. – М.: Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности, 2014. – Серия 03. Вып. 78. – 276 с.
3. Комаров В.Б., Килькеев Ш.Х. Рудничная вентиляция. – М.: Недра, 1969. – 416 с.
4. Красноштейн А.Е., Казаков Б.П., Шалимов А.В. К моделированию сложных аэрогазотермодинамических процессов в атмосфере // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2008. – № 6. – С. 105–111.
5. Bruce W.E. Natural draft: its measurement and modeling in underground mine ventilation systems. – US: Dept. of Labor, Mine Safety and Health Administration, 1986. – 34 p.
6. Linden P.F. The fluid mechanics of natural ventilation // Annual Review of Fluid Mechanics. – 1999. – Vol. 31. – P. 201–238. DOI: 10.1146/annurev.fluid.31.1.201
7. Alymenko N.I., Nikolaev A.V. Influence of mutual alignment of mine shafts on thermal drop of ventilation pressure between the shafts // Journal of Mining Science. – 2011. – Vol. 47, № 5. – P. 636–642. DOI: 10.1134/S1062739147050121.
8. Левин Л.Ю., Семин М.А., Газизуллин Р.Р. Численное моделирование изменения воздухо-распределения в рудничных вентиляционных сетях при реверсировании главной вентиляторной установки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 12. – С. 164–170.
9. Comprehensive and integrated mine ventilation consultation model / Jianwei Cheng, Yan Wu, Haiming Xu, Jin Liu, Yekang Yang, Huangjun Deng, Yi Wang // Tunneling and Underground Space Technology. – 2015. – Vol. 45. – P. 166–180. DOI: 10.1016/j.tust.2014.09.004
10. Hanjalic K., Launder B.E. A Reynolds stress model of turbulence and its application to thin shear flows // J. Fluid Mech. – 1972. – Vol. 52, № 4. – P. 609–638. DOI: 10.1017/S002211207200268X
11. Van Ulden, Holtslag A. Estimation of atmospheric boundary layer parameters for diffusion applications // J. Clim. Appl. Meteorol. – 1985. – Vol. 24. – P. 1196–1207. DOI: 10.1175/1520-0450(1985)024<1196:EOABLP>2.0.CO;2
12. Kempson W.J., Webber-Youngman R.C.W., Meyer J.P. Optimising shaft pressure losses through computational fluid dynamic modeling // Applied Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 90. – P. 1098–1108. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2015.04.058
13. Gendler S.G. The justification of new technique ventilation at contraction of working with two exits in soil surface // Eurasian Mining. – 2016. – № 2. – P. 41–44. DOI:10.17580/em.2016.02.10
14. Николаев А.В., Файнбург Г.З. Об энерго- и ресурсосберегающем проветривании подземных горных выработок // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 14. – С. 92–98. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.14.10
15. Николаев А.В. Анализ теоретической формулы, определяющей величину естественной тяги между воздухоподающим и вентиляционным стволами // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2009. – № 10. – С. 72–75.

16. Николаев А.В. Зависимость потребления электроэнергии главной вентиляторной установки от способа проветривания добычных участков калийных рудников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2011. – № 1. – С. 143–151.

17. Результаты исследования системы вентиляции рудника БКПРУ-2 в холодное время года / Н.И. Алыменко, А.В. Николаев, А.А. Каменских, А.П. Тронин // Вестник Пермского университета. Геология. – 2011. – № 3. – С. 89–96.

18. Николаев А.В., Алыменко Н.И. Применение системы кондиционирования воздуха с учетом тепловых депрессий, действующих между стволами // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 12. – С. 12–15.

19. Николаев А.В., Алыменко Н.И., Седуни А.М. Автоматизированная ресурс- и энергосберегающая система воздухоподготовки шахтного воздуха // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 11. – С. 14–18.

20. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика в задачах и упражнениях. – М.: ЮНИТИ, 2001. – 270 с.

21. Лялькина Г.Б., Бердышев О.В. Математическая обработка результатов эксперимента: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 78 с.

22. Kruiniger H. On the estimation of panel regression models with fixed effects / Department of Economics Queen Mary University of London. – London, 2002. – 41 p.

23. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями. – М.: Иностран. лит-ра, 1956. – 664 с.

24. Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.И. Многомерные статистические методы. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 352 с.

25. Devore J.L., Berk K.N. Modern mathematical statistics with applications. – Springer, 2011. – 857 p.

26. Трусов П.В. Введение в математическое моделирование. – М.: Логос, 2005. – 440 с.

27. Чигиринская Н.В. Общие принципы конструирования когерентно-стохастических учебных задач как средства развития стохастической культуры студентов технического вуза // Современные проблемы науки и образования. – 2017. – № 1. – С. 121.

28. Николаев А.В. Управление тепловыми депрессиями в системах вентиляции калийных рудников: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Перм. национал. исслед. политех. ун-т. – Пермь, 2012. – 20 с.

29. Николаев А.В. Метод расчета величины общерудничной естественной тяги // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S-2-2. – С. 12–17.

30. Lyalkina G.B., Nikolaev A.V. Natural draught and its direction in a mine at the preset confidence coefficient // Journal of Mining Science. – 2015. – Vol. 51, № 2. – P. 342–346. DOI: 10.1134/S1062739115020180

31. Development of an air flow sensor for heating, ventilating, and air conditioning systems based on printed circuit board technology / Th. Glatzl, H. Steiner, F. Kohl, Th. Sauter, F. Keplinger // Sensors and Actuators A: Physical. – 2016. – Vol. 237. – P.1–8. DOI: 10.1016/j.sna.2015.11.016

References

1. Mokhiev N.N., Radko V.V. Inzhenernye raschety ventilatsii shakht. Stroitelstvo. Rekonstruktsiia. Ekspluatatsiia [Engineering calculations of ventilation of mines. Construction. Reconstruction. Operation]. Moscow, Nedra-Biznessentr, 2007, 324 p.

2. Pravila bezopasnosti pri vedenii gornykh rabot i pererabotke tverdykh poleznykh iskopaemykh. Federalnye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti [Safety rules for conducting mining and processing of solid minerals. Federal rules and regulations in the field of industrial safety]. Moscoow, Nauchno-tekhnikeskii tsentr issledovaniy problem promyshlennoi bezopasnosti, 2014, Series 03, iss.78, 276 p.

3. Komarov V.B., Kilkeev Sh.Kh. Rudnichnaia ventilatsiia [Mine ventilation]. Moscow, Nedra, 1969, 416 p.

4. Krasnoshtein A.E., Kazakov B.P., Shalimov A.V. K modelirovaniu slozhnykh aerogazotermodynamicheskikh protsessov v atmosfere [To modeling complex aerogasothermodynamic processes in the atmosphere]. Fiziko-tekhnikeskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh, 2008, no.6, pp.105-111.

5. Bruce W.E. Natural draft: its measurement and modeling in underground mine ventilation systems. US: Dept. of Labor, Mine Safety and Health Administration, 1986, 34 p.

6. Linden P.F. The fluid mechanics of natural ventilation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1999, vol.31, pp.201-238. DOI: 10.1146/annurev.fluid.31.1.201

7. Alymenko N.I., Nikolaev A.V. Influence of mutual alignment of mine shafts on thermal drop of ventilation pressure between the shafts. *Journal of Mining Science*, 2011, vol.47, no.5, pp.636-642. DOI: 10.1134/S1062739147050121

8. Levin L.Iu., Semin M.A., Gazizullin R.R. Chislennoe modelirovanie izmeneniia vozdukhoraspredeleniia v rudnichnykh ventilatsionnykh setiakh pri reversirovanii glavnoi ventilatornoi ustanovki [Numerical simulation of air distribution variation in mine ventilation networks in case of main fan reversal]. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy biulleten*, 2015, no.12, pp.164-170.

9. Jianwei Cheng, Yan Wu, Haiming Xu, Jin Liu, Yekang Yang, Huangjun Deng, Yi Wang. Comprehensive and integrated mine ventilation consultation model. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2015, vol.45, pp.166-180. DOI: 10.1016/j.tust.2014.09.004

10. Hanjalic K., Launder B.E. A Reynolds stress model of turbulence and its application to thin shear flows. *J. Fluid Mech.*, 1972, vol.52, no.4, pp.609-638. DOI: 10.1017/S002211207200268X

11. Van Ulden, Holtslag A. Estimation of atmospheric boundary layer parameters for diffusion applications.

J. Clim. Appl. Meteorol., 1985, vol.24, pp.1196-1207. DOI: 10.1175/1520-0450(1985)024<1196:EOABLP>2.0.CO;2

12. Kempson W.J., Webber-Youngman R.C.W., Meyer J.P. Optimising shaft pressure losses through computational fluid dynamic modelling. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol.90, pp.1098-1108. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.058

13. Gendler S.G. The justification of new technique ventilation at contraction of working with two exits in soil surface. *Eurasian Mining*, 2016, no.2, pp.41-44. DOI: 10.17580/em.2016.02.10

14. Nikolaev A.V., Fainburg G.Z. On energy and resource-saving of underground oil mine workings. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2015, no.14, pp.92-98. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.14.10

15. Nikolaev A.V. Analiz teoreticheskoi formuly, opredeliaiushchei velichinu estestvennoi tiagi mezhdu vozdukhopodaiushchim i ventilatsionnym stvolami [Analysis of theoretical formula determining value of natural draught between downcast ventilation and air shafts]. *Geologiya, geofizika i razrabotka nefதியanykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2009, no.10, pp.72-75.

16. Nikolaev A.V. The influence of consumption electric power is spent for work main ventilation installation from the way ventilation underground mountain developments the potash mines. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2011, no.1, pp.143-151.

17. Alymenko N.I., Nikolaev A.V., Kamenskikh A.A. Tronin ap rezultaty issledovaniia sistemy ventilatsii rudnika BKPRU-2 v kholodnoe vremia goda [The results of research of the ventilation systems survey for BPIMG-2 mine in the cold season]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2011, no.3, pp.89-96.

18. Nikolaev A.V., Alymenko N.I. Primenenie sistemy konditsionirovaniia vozdukh s uchedom teplovykh depressii deistvuiushchikh mezhdu stvolami [Application of the system air-conditioning are consider of natural draught operating between the mine shafts]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2011, no.12, pp.12-15.

19. Nikolaev A.V., Alymenko N.I., Sedunin A.M. Avtomatizirovannaia resurso- i energosberegaiushchaia sistema vozdukhopodgotovki shakhtnogo vozdukh [Automated resource and energy saving system of air preparation of mine air]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2013, no.11, pp.14-18.

20. Aivazian S.A., Mkhitarian V.S. Prikladnaia statistika v zadachakh i uprazhneniiakh [Applied statistics in tasks and exercises]. Moscow, IUNITI, 2001, 270 p.

21. Lialkina G.B., Berdyshev O.V. Matematicheskai obrabotka rezultatov eksperimenta [Mathematical processing of experimental results]. Perm, Izdatelstvo Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2013, 78 p.

22. Kruiiger H. On the estimation of panel regression models with fixed effects. Department of Economics Queen Mary. University of London, 2002, 41 p.

23. Khald A. Matematicheskai statistika s tekhnicheskimi prilozheniiami [Mathematical statistics with technical applications]. Moscow, Inostrannaia literatura, 1956, 664 p.

24. Dubrov A.M., Mkhitarian V.S., Troshin L.I. Mnogomernye statisticheskie metody [Multidimensional statistical methods]. Moscow, Finansy i statistika, 2003, 352 p.

25. Devore J.L., Berk K.N. Modern mathematical statistics with Applications. Springer, 2011, 857 p.

26. Trusov P.V. Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie [Introduction to Mathematical Modeling]. Moscow: Logos, 2005, 440 p.

27. Chigirinskaia N.V. Obshchie printsipy konstruirovaniia kogerentno-stokhasticheskikh uchebnykh zadach kak sredstva razvitiia stokhasticheskoi kultury studentov tekhnicheskogo vuza [General principles of constructing coherent stochastic educational tasks as means of development of stochastic culture of students of a technical university]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2017, no.1, pp.121.

28. Nikolaev A.V. Upravlenie teplovymi depressiiami v sistemakh ventilatsii kaliinykh rudnikov [Management of thermal depression in ventilation systems of potassium mines]. Abstract of Ph. D. Thesis. Perm, 2012, 20 p.

29. Nikolaev A.V. Metod rascheta velichiny obshche-rudnichnoi estestvennoi tiagi [Management of thermal depression in ventilation systems of potassium mines]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2011, no.S-2-2, pp.12-17.

30. Lyalkina G.B., Nikolaev A.V. Natural draught and its direction in a mine at the preset confidence coefficient. *Journal of Mining Science*, 2015, vol.51, no.2, pp.342-346. DOI: 10.1134/S1062739115020180

31. Glatzl Th., Steiner H., Kohl F., Sauter Th., Keplinger F. Development of an air flow sensor for heating, ventilating, and air conditioning systems based on printed circuit board technology. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, vol.237, pp.1-8. DOI: 10.1016/j.sna.2015.11.016

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Лялькина Г.Б., Николаев А.В., Макарычев Н.С. Методика расчета величины и направления общерудничной естественной тяги с заданной доверительной вероятностью // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т.17, №2. – С.181–188. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.7

Please cite this article in English as:

Lyalkina G.B., Nikolaev A.V., Makarychev N.S. Method of calculation of volume and direction of general mine natural draft with confident probability. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol.17, no.2, pp.181-188. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.7