



УДК 622.414

## ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ АЭРОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ МЕТАНООПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК НА ШАХТАХ ВЬЕТНАМА

В.В.СМИРНЯКОВ<sup>1</sup>, Нгуен Минь ФЬЕН<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Горный научно-технологический институт, Ханой, Вьетнам

В статье предложены методы оценки аэрологической обстановки с учетом наличия мест потенциально возможных скоплений взрывоопасных газов при проведении подготовительных выработок, выполняемой с целью нормализация условий ведения горных работ. Для повышения безопасности подготовительной выработки по газовому фактору разработана ее комплексная оценка согласно динамике метановыделения и распределению воздуха по длине выработки, наибольшее влияние на которое оказывает характер утечек из трубопровода. При этом необходимо совершенствование методики расчета проветривания подготовительной выработки, заключающееся в учете общего аэродинамического сопротивления работе вентилятора местного проветривания, в состав которого входят дополнительные местные сопротивления участков выработки. Целочисленное моделирование программным комплексом FLOWVision движения газоздушных потоков позволяет оценить изменение концентрации метана в зонах местных скоплений.

**Ключевые слова:** аэродинамика тупиковых выработок, взрывоопасность, местные скопления, концентрация метана, сопряжения выработок, аэродинамическое сопротивление, численное моделирование

**Как цитировать эту статью:** Смирняков В.В. Обоснование методики аэрологической оценки метаноопасности при проведении подготовительных выработок на шахтах Вьетнама / В.В.Смирняков, Нгуен Минь Фьен // Записки Горного института. 2018. Т. 230. С. 197-203. DOI: 10.25515/PMI.2018.2.197

**Введение.** Во Вьетнаме активно осуществляется подземная (шахтная) добыча угля на больших глубинах. При этом существенно затрудняются условия ведения подземных горных работ в связи с повышением газоносности пластов и усложнением шахтных вентиляционных сетей. Для повышения добычи необходимо внедрение новых высокопроизводительных выемочных комплексов, что связано с увеличением объема подготовительных работ. В этих условиях важнейшими элементами обеспечения аэрологической безопасности являются достоверный прогноз мест скопления метана в общем объеме подготовительных выработок и адекватная оценка количества воздуха, необходимого для их проветривания по газовому фактору.

Исследованием вопросов повышения безопасности угольных шахт Вьетнама по газовому фактору занимались вьетнамские исследователи Нгуен Ань Туан (2009), Чан Ту Ба (2010) и др. Однако для решения задач настоящих исследований необходимо изучение опыта России, где на основе фундаментальных исследований разработаны современные инженерные методы борьбы с газовым фактором в условиях отработки газоносных пластов [1, 5, 6, 12]. Методики прогноза газовыделений и расчета требуемых количеств воздуха по газовому фактору изложены в нормативных документах [15]. Практика ведения работ в условиях множества взаимно влияющих друг на друга факторов показала, что наиболее рациональным методом обеспечения безопасности ведения горных работ является заблаговременная оценка аэрогазодинамической обстановки, выполненная с учетом наличия в пространстве выработки мест потенциально возможных скоплений взрывоопасных газов.

При разработке методики оценки аэрогазодинамической обстановки решены следующие основные задачи:

- анализ взаимосвязи непосредственных, способствующих и сопутствующих причин взрывов газа в угольных шахтах Вьетнама и России;
- исследование и дифференцирование различных факторов, влияющих на формирование газовой обстановки и динамику газовыделений в комплексе тупиковых и сквозных подготовительных выработок;
- изучение механизмов формирования местных скоплений метана в комплексе тупиковых подготовительных выработок;
- разработка методики и проведение производственных наблюдений для изучения динамики газовой обстановки в комплексе тупиковых подготовительных выработок;

• научное обоснование и разработка проектных методов расчета и контроля вентиляции тупиковых выработок по газовому фактору.

**Методы исследований.** В процессе выполнения работы проводились: анализ и обобщение научного и практического опыта проветривания подготовительных выработок угольных шахт Вьетнама и России; обработка и статистический анализ результатов натуральных данных воздушных и газовых съемок; численное математическое моделирование распределения воздуха и газовых примесей с использованием современных программных комплексов; аналитические исследования расчетных формул. Предложено оценивать аэрологическую безопасность подготовительной выработки с учетом динамики метановыделения и распределения воздуха по длине выработки, наибольшее влияние на который оказывает характер утечек из трубопровода [11].

**Результаты исследований.** Для уточнения закономерностей при влиянии приведенных факторов, а также для определения фактического аэродинамического сопротивления вентиляционных трубопроводов проведены натурные наблюдения. Полученные зависимости представлены на рис.1.

Проведенные исследования показали, что аналитическое определение утечек по длине вентиляционного трубопровода в ряде случаев дает результаты, значительно отличающиеся от данных натуральных наблюдений. Эксперименты показали, что среди обследованных трубопроводов для условий угольных шахт только 3,4 % имеют утечки воздуха в пределах величин, принятых существующими нормативными и справочными изданиями, а в остальных случаях они больше [5, 9].

Анализ результатов натуральных исследований показал, что величина утечек по длине трубопровода хорошо описывается уравнением вида  $y = 1 + a(1 - x)^n$ . Результаты аппроксимации представлены в виде зависимости

$$\frac{Q(x)}{Q_3} = 1 + (k_{\text{тр}} - 1) \left(1 - \frac{x}{L_{\text{тр}}}\right)^n, \quad (1)$$

где  $k_{\text{тр}}$  – коэффициент утечек воздуха в пределах расчетной длины  $L_{\text{тр}}$  трубопровода.

Расчетное количество воздуха, протекающего по выработке в любом ее сечении с учетом распределенных по длине утечек воздуха, выражается формулой

$$Q(x) = Q_{\text{тр}}(x) = Q_3 + (Q_{\text{выр}} - Q_3) \left(1 - \frac{x}{L_{\text{тр}}}\right)^n. \quad (2)$$

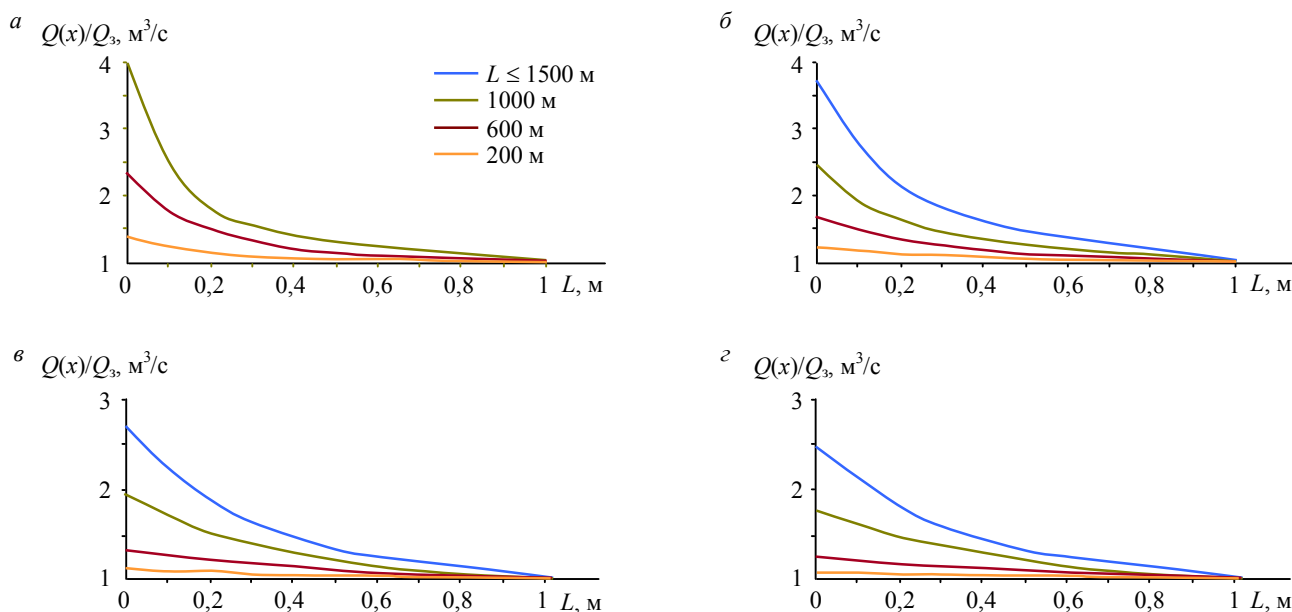


Рис.1. Характерные зависимости распределения относительного расхода вдоль безразмерной длины выработки для выработок различной длины и диаметра трубопровода (длина звена 20 м,  $Q_3 \leq 5 \text{ м}^3/\text{с}$ )  
 $a - d_{\text{тр}} = 0,6 \text{ м}$ ;  $б - d_{\text{тр}} = 0,8 \text{ м}$ ;  $в - d_{\text{тр}} = 1,0 \text{ м}$ ;  $г - d_{\text{тр}} = 1,2 \text{ м}$

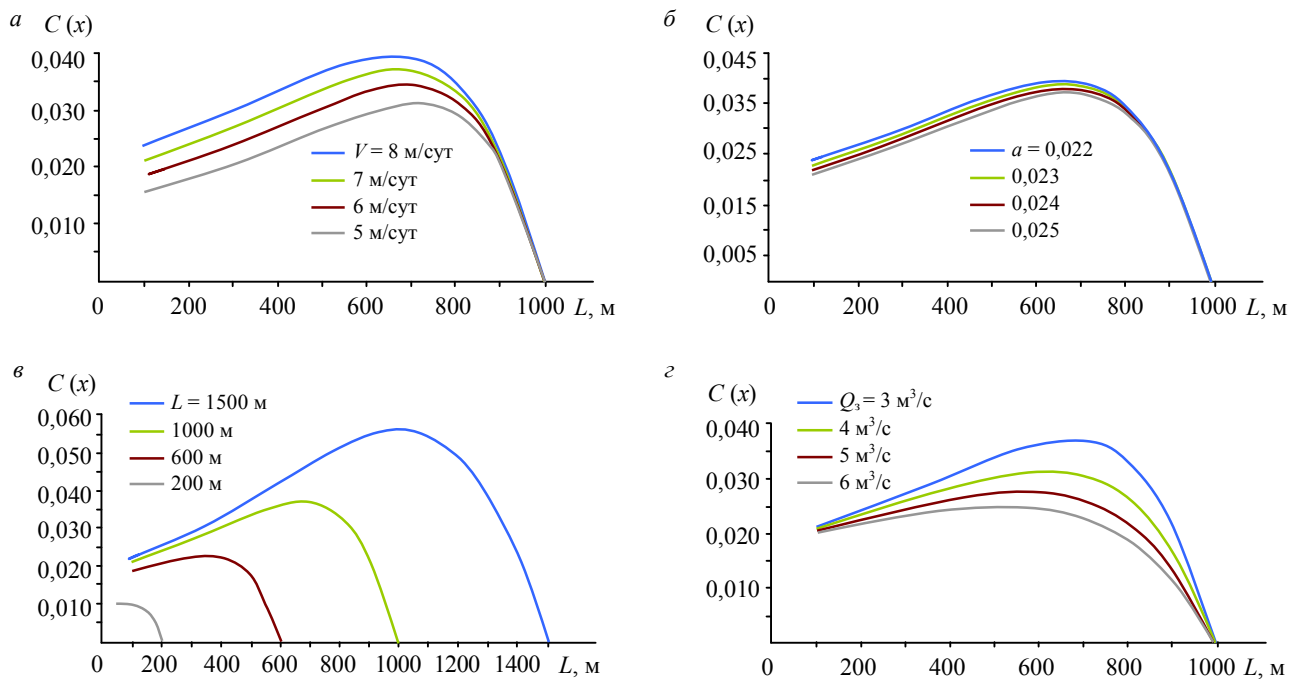


Рис.2. Характер зависимости изменения концентрации метана по длине выработки и наличии в трубопроводе утечек при изменении расчетных параметров: а – скорости проведения выработки  $V$ ; б – коэффициента  $a$ ; в – длины выработки  $L$ ; г – количества воздуха, подаваемого в забой  $Q_3$ .

Полученная зависимость (2) имеет качественное совпадение с результатами натуральных наблюдений и позволяет определять численное значение утечек воздуха из вентиляционного трубопровода в тупиковую часть выработки.

Зависимость изменения концентрации метана на участке выработки длиной  $x$  при наличии в трубопроводе утечек и с учетом общего газовыделения имеет вид [6]:

$$C(x) = \left(\frac{P}{Q(x)}\right) \left(\frac{g_0 V}{a}\right) \left(1 - e^{-\frac{a(L-x)}{V}}\right), \quad (3)$$

где  $a$  – коэффициент, характеризующий степень снижения удельной объемной скорости выделения метана через обнаженную поверхность угля, 1/сут;  $g_0$  – начальная величина удельной объемной скорости выделения метана, ( $\text{м}^3/(\text{мин}\cdot\text{м}^2)$ );  $V$  – скорость проходки выработки, м/сут;  $P$  – периметр газоотдающей поверхности в выработке, м.

Выражение (3) представляет собой зависимость, характеризующую изменение концентрации метана при распределенных по длине выработки утечках как из вентиляционного трубопровода [6]. В промежуточной точке между забоем и устьем выработки зависимость имеет максимум с самой высокой концентрацией метана (рис.2).

Анализ полученных зависимостей показывает, что смещению точки с повышенной концентрацией в сторону устья выработки способствуют следующие факторы [6]: уменьшение утечек из трубопровода; повышение скорости проведения выработки; увеличение протяженности выработки; увеличение количества воздуха, подаваемого в забой.

Для контроля метана в зоне повышенной концентрации необходима установка дополнительных датчиков, что способствует повышению аэрологической безопасности подготовительной выработки [6, 16].

В ходе исследований выполнен проверочный расчет всех возможных сопротивлений элементов тупиковых выработок при различных расходах и углах сопряжения выработок. Рассматривались следующие виды сопротивлений, которые при обычном расчете детально не учитываются повороты, сужения, расширения выработок, трение крепи, сопряжения выработок. Схемы к расчету приведены на рис.3.

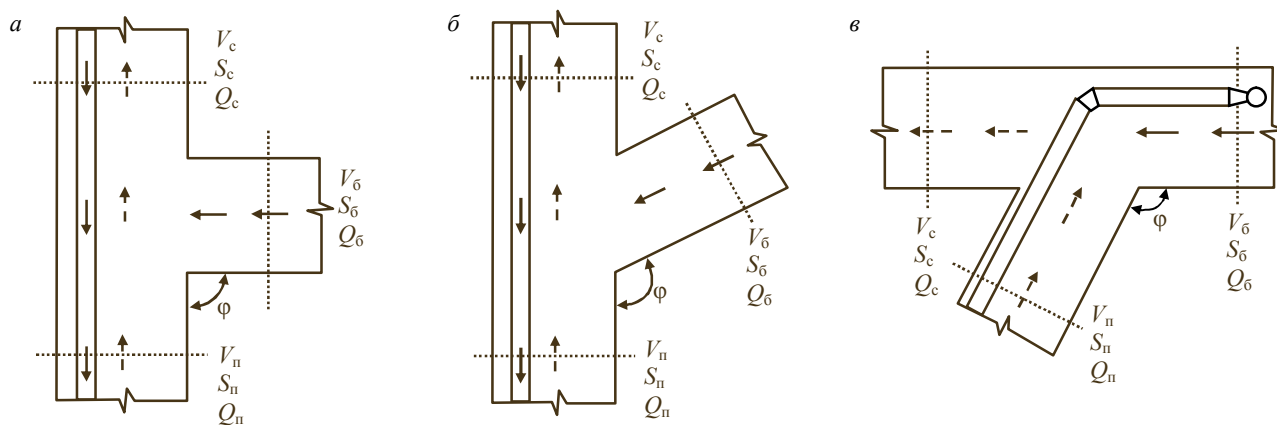


Рис.3. Схемы к расчету местного сопротивления сопряжения:  
а – при  $\varphi \leq 90^\circ$ ; б – при  $180^\circ > \varphi > 90^\circ$  прямой проход струи; в – при  $180^\circ > \varphi > 90^\circ$  проход струи с поворотом

Расчет коэффициента местного сопротивления приточного сопряжения проводился по формулам, используемым в аэрологии и промышленной вентиляции для углов  $\varphi \leq 90^\circ$  при условии прямого прохода воздушной струи [7, 10] (рис.3, а):  
для угла  $\varphi = 90^\circ$

$$\xi_{\text{пс}} = \frac{\alpha \chi \left( V_{\text{п}}^2 - 2V_{\text{п}} V_{\text{с}} \frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{с}}} + V_{\text{с}}^2 \right)}{V_{\text{п}}^2};$$

для угла  $\varphi < 90^\circ$

$$\xi_{\text{пс}} = \frac{\alpha \chi \left( V_{\text{п}}^2 - 2V_{\text{с}} \left( \frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{с}}} V_{\text{п}} + \frac{Q_{\text{б}}}{Q_{\text{с}}} V_{\text{б}} \cos \varphi \right) V_{\text{с}} \right)}{V_{\text{п}}^2},$$

где  $Q_{\text{п}}$ ,  $Q_{\text{б}}$ ,  $Q_{\text{с}}$  – расходы воздуха в выработках,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\alpha$  – коэффициент аэродинамического сопротивления трения,  $(\text{Н} \cdot \text{с}^2)/\text{м}^8$ ;  $\varphi$  – угол сопряжения;  $\chi$  – поправочный коэффициент формы сечения;  $S_{\text{п}}$ ,  $S_{\text{б}}$ ,  $S_{\text{с}}$  – площади поперечного сечения выработок,  $\text{м}^2$ .

Величина местного сопротивления сопряжения определяется по формуле

$$R_{\text{пс}} = \frac{\alpha \chi \rho \left( V_{\text{п}}^2 - 2V_{\text{п}} V_{\text{с}} \frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{с}}} + V_{\text{с}}^2 \right)}{2Q_{\text{п}}^2}.$$

При определенных условиях  $\xi_{\text{пс}}$  может достигать значительных величин. При  $\xi_{\text{с}} = 65$  в зависимости от значений площадей сечения относительная величина сопряжения составит дополнительные 4-6 % к сопротивлению трубопровода при длине 1000 м.

Для расчета сопряжения выработок под углом  $180^\circ > \varphi > 90^\circ$  проведен расчет при различных расходах и углах по формулам, полученным опытным путем при физическом моделировании [3] (рис.3, б, в).

Для прямого прохода струи и прохода струи с поворотом коэффициенты местного сопротивления приточного сопряжения определялись по соответствующим формулам:

$$\xi_{\text{пс}} = \frac{6,27}{\rho(1 + \cos \varphi)} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{п}}} \left( \frac{Q_{\text{б}}}{Q_{\text{п}}} \right)^2;$$

$$\xi_{\text{пс}} = \frac{12,44}{\rho(1 + \cos \varphi)} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{п}}} \left( \frac{Q_{\text{б}}}{Q_{\text{п}}} \right)^2.$$

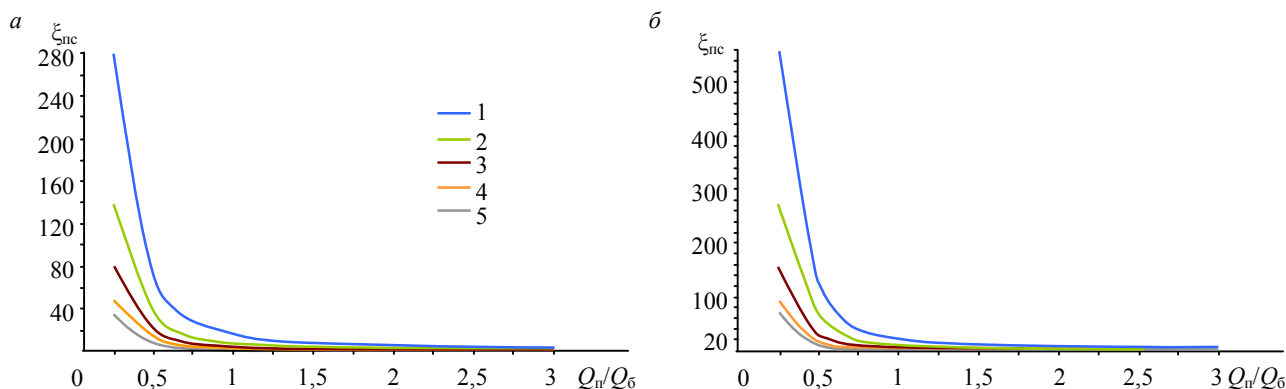


Рис.4. Результаты расчета коэффициентов местного сопротивления (при  $\varphi = 135^\circ$ ):  
а – для прямого прохода струи; б – для прохода струи с поворотом  
1 – квадратное сечение; 2 – арочное; 3 – сложное; 4 – прямоугольное; 5 – круглое

Результаты приведены на рис.4, из которого видно, что при малых значениях соотношений расходов коэффициент местного сопротивления сопряжения для прямого прохода струи составит максимальную величину  $\xi_{\text{мс}} = 280$ , а для прохода струи с поворотом ( $\varphi = 135^\circ$ ) при малых значениях соотношений расходов коэффициент местного сопротивления сопряжения составит максимальную величину  $\xi_{\text{мс}} = 554$ . При этом общее сопротивление выработки с учетом сопротивления сопряжения возрастет более чем на 14-28 % относительно сопротивления трубопровода.

На основании приведенных результатов аналитических исследований можно сделать вывод, что подобные виды аэродинамических сопротивлений при определенных условиях необходимо учитывать при расчете вентиляции тупиковых выработок.

Предлагаемое совершенствование методики расчета проветривания подготовительной выработки позволит определить дополнительное сопротивление работе вентилятора местного проветривания участков выработки, включающих в себя местные сопротивления сопряжений.

Основной задачей в процессе исследований являлось определение возможности применения программного продукта FlowVision для математического моделирования течения воздушных потоков в местах потенциально возможных местных скоплений и горного оборудования с геометрическими параметрами расчетных моделей, соответствующих реальным условиям. С этой целью были созданы математические 3D-модели выработок и ниш некоторых сечений и конфигураций в формате VRML, являющиеся геометрическими границами движения потоков воздуха. Для создания 3D-моделей в формате STL был использован пакет программ SolidEdge (Siemens). Далее модели были импортированы в программу FlowVision, в которой численно решены уравнения Навье – Стокса для несжимаемой жидкости. Данные 3D-модели являются геометрическими границами движения потоков воздуха [2, 13, 14].

В качестве модели расчета принято течение «несжимаемой жидкости» и заданы следующие начальные условия: температура 293 К; давление 101000 Па; молекулярная масса 28,9 г/моль; плотность 1,21 кг/м<sup>3</sup>; динамическая вязкость  $1,82 \cdot 10^{-6}$  Па·с. Граничные условия: стенка с логарифмическим пограничным слоем и шероховатостью стенок – 0,2; вход и выход с заданной скоростью 0,15 м/с – плоскость [17]. При моделировании процессов распределения воздушных потоков были решены следующие задачи:

- произведена оценка адекватности картины поля скоростей реальным условиям;
- получены поля скоростей при проветривании подготовительных выработок.

При моделировании распределения газовых примесей дополнительно вводились условия взаимодействия двух веществ – воздуха и метана; вход и выход метана с заданной скоростью. Задавались следующие параметры: длина тупиковой выработки, длина участка со сквозной струей, примыкание тупика к выработке со сквозной струей под прямым углом, ширина выработки, площадь поперечного сечения.

Примеры визуализации скорости воздушных потоков и распределения полей концентрации и выделения метана в примыкающих выработках – нишах приведены на рис.5.

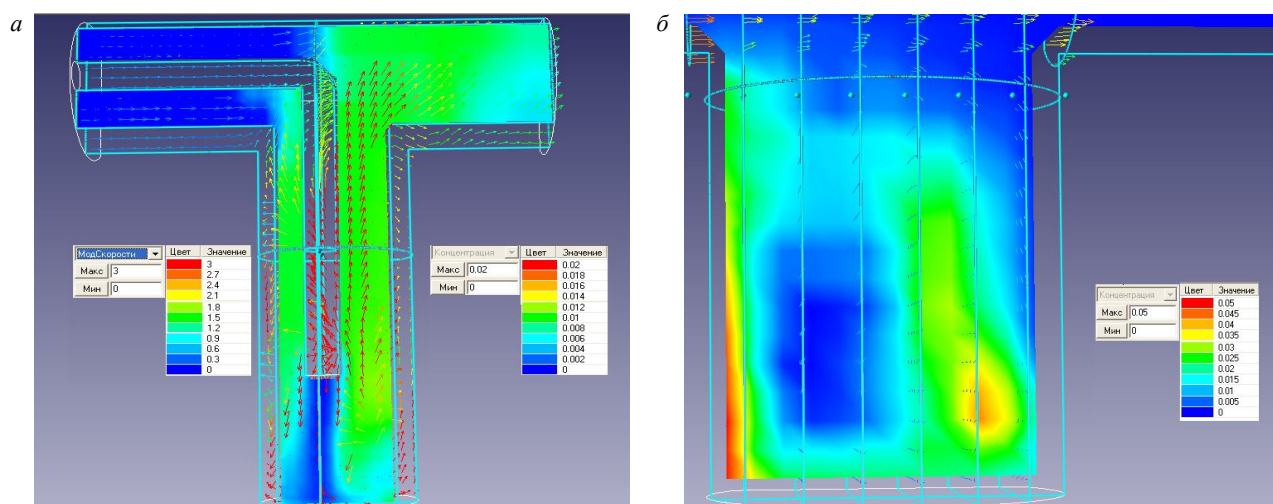


Рис.5. Распределение скоростей потока и полей концентрации метана в тупиковой выработке (а); в нише (б)

В ходе исследований установлено, что расположение оборудования в тупиках и нишах влияет на аэродинамическую картину потоков и способствует возможному появлению местных скоплений метана повышенной концентрации [8].

Таким образом, динамику и мониторинг взрывоопасных концентраций метана в призабойном пространстве и в протяженной части тупиковых подготовительных выработок возможно проводить с помощью математического моделирования [16, 17].

## Выводы

1. Обобщение и сравнительный анализ аэрологической безопасности шахт Вьетнама показали, что предпосылки к возникновению аварий, причины которых связаны с особенностями аэрогазодинамических процессов, устраняются только при своевременном обнаружении взрывоопасных скоплений метана не только в призабойном пространстве, но и в остальной рабочей зоне тупиковых подготовительных выработок в областях формирования застойных зон, образованных изменениями конфигурации и площади сечения, сопряжениями выработок, наличием оборудования.

2. В основе разработанного метода аэрологической оценки метаноопасности подготовительной выработки лежит полученная зависимость, характеризующая изменение концентрации метана при распределенных по длине выработки утечек из вентиляционного трубопровода. Анализ зависимости показывает, что в промежуточной точке между забоем и устьем выработки поле концентрации метана имеет максимум, где необходимо применять дополнительные меры контроля.

3. Максимальную величину неучитываемого при обычном расчете сопротивления работе вентилятора имеют аэродинамические сопротивления сопряжений выработок, наибольшее влияние на величину их аэродинамического сопротивления оказывают форма сечения, соотношение расходов в выработках и угол сопряжения.

4. В качестве наиболее рационального решения, направленного на повышение эффективности проветривания, предложено совершенствование методики расчета проветривания подготовительной выработки, заключающееся в учете общего аэродинамического сопротивления работе вентилятора местного проветривания, в составе которого необходимо учитывать сопротивление не только трубопровода, но и дополнительные местные сопротивления участков выработки.

5. Целочисленное моделирование программным комплексом FLOWVISION движения газовоздушных потоков позволяет оценить изменение концентрации метана в зонах местных скоплений. Для моделирования натуральных условий решающее значение имеет соблюдение геометрического подобия, при этом расположение оборудования в тупиках и нишах и изменение формы примыканий влияют на аэродинамическую картину потоков и способствуют появлению местных скоплений метана повышенной концентрации.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Айруни А.Т. Взрывоопасность угольных шахт / А.Т.Айруни, Ф.С.Клебанов, О.В.Смирнов. М.: Горное дело, 2011. 264 с.
2. Аксенов А.А. Новый релиз программного комплекса вычислительной газодинамики FlowVision // САПР и графика. 2014. № 1. С. 27-29.
3. Вассель Р.Я. Расчет воздушных завес для регулирования распределения количества воздуха в подземных выработках // Вентиляция шахт и рудников / Ленинградский горный институт. Л., 1989. С. 41-45.
4. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
5. Качурин А.М. Прогноз динамики метановыделения и обеспечение аэрологической безопасности при проведении подготовительных выработок: Автореф. дис...канд. техн. наук / МГГУ. М., 2013. 17 с.
6. Клебанов Ф.С. Воздух в шахте. М.: Изд-во «Имидж», 1995. 575 с.
7. Краснов Ю.С. Системы вентиляции и кондиционирования: рекомендации по проектированию для производственных и общественных зданий. М.: Техносфера, 2006. 288 с.
8. Лоцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
9. Накаряков Е.В. Определение параметров работы ВМП на гибкий трубопровод при проветривании протяженных тупиковых выработок // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Сборник научных трудов; УрО РАН. Пермь, 2016. С. 281-285.
10. Насосы. Вентиляторы. Кондиционеры: Справочник / Н.В.Коченков, И.В.Золотухин, Ю.Е.Тупицин, Е.М.Росляков. СПб: Политехника, 2006. 822 с.
11. Нгуен Минь Фьен. Анализ области применения схем проветривания газообильных протяженных тупиковых выработок для угольных шахт Вьетнама // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск. 2015. № 7. С. 110-116.
12. Полевщиков Г.Я. Динамические газопроявления при проведении подготовительных и вскрывающих выработок в угольных шахтах. Кемерово: Институт угля и углехимии СО РАН, 2003. 317с.
13. Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа / Т.В.Кондранин, Б.К.Ткаченко, М.В.Березникова и др.; МФТИ. М., 2005. 104 с.
14. Росляков П.В. Численное исследование аэродинамики закрученных потоков в трубах и газоходах. Прикладные исследования в механике / П.В.Росляков, И.Л.Ионкин, Л.Л.Новожилова // Труды V научной конференции «Инженерные системы – 2007». М.: ЦИАМ, 2007. С. 33-42.
15. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт / МакНИИ. Макеевка – Донбасс, 1989. 320 с.
16. Смирняков В.В. Недостатки систем газовой защиты как причины взрывов метана на шахтах Вьетнама / В.В.Смирняков, А.Ф.Романов, Нгуен Минь Фьен // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск. 2015. № 7. С. 429-437.
17. Смирняков В.В. Моделирование процессов формирования застойных зон в газообильных подготовительных выработках / В.В.Смирняков, М.М.Попов, Нгуен Минь Фьен // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск. 2015. № 7. С. 419-428.

**Авторы:** **В.В.Смирняков**, канд. техн. наук, доцент, [smirnyakovvv@yandex.ru](mailto:smirnyakovvv@yandex.ru) (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **Нгуен Минь Фьен**, канд. техн. наук, научный сотрудник, [minhphientatm@gmail.com](mailto:minhphientatm@gmail.com) (Горный научно-технологический институт, Ханой, Вьетнам).

Статья принята к публикации 14.06.2017.