

Адаптация объемных моделей вентиляционных сетей подземных рудников для задач математического моделирования при использовании аналитического комплекса «АэроСеть»

С.В. Копин¹, И.В. Зырянов² ✉

¹ Институт «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация

² Мирнинский политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета
им. М.К. Аммосова, г. Мирный, Российская Федерация

✉ zyryanoviv@inbox.ru

Резюме: Разработка сетевых моделей вентиляционных сетей рудников не обходится без специального программного обеспечения. В статье представлены практические рекомендации по адаптации объемных моделей вентиляционных сетей горнорудных предприятий для задач математического моделирования при наиболее производительном варианте создания графического аналога в среде аналитического комплекса «АэроСеть». Представленный материал совместного использования (импорта) рабочих схем вентиляции из чертежных программ AutoCAD или Micromine для лучшего управления проектом и его результатами, а также дальнейшей работы с ним позволяют оперативно вводить описание горизонтов отработки рудного тела и капитальных выработок, требующих особого внимания при выборе параметров основного вентиляционного оборудования, с учетом алгоритмов математического программирования. Разработка технических решений на основании численного моделирования на базе приложения «АэроСеть» позволяет оптимизировать капитальные и эксплуатационные затраты на организацию проветривания горного предприятия при условии максимального соответствия исходных и модельных параметров, принятых для выполнения анализа вентиляционной сети.

Ключевые слова: сетевая модель, аналитический комплекс, вентиляция рудников, схема выработок, компьютерное моделирование, тупиковая выработка, расход воздуха, математические модели рудников

Для цитирования: Копин С.В., Зырянов И.В. Адаптация объемных моделей вентиляционных сетей подземных рудников для задач математического моделирования при использовании аналитического комплекса «АэроСеть». *Горная промышленность*. 2025;(6):82–87. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-82-87>

Adaptation of 3D models of underground mine ventilation systems for mathematical modelling using the AeroSet analytical software application

S.V. Kopin¹, I.V. Zyryanov² ✉

¹ Institute “Yakutnioproalmaz”, ALROSA PJSC, Mirny, Russian Federation

² Mirny Polytechnic Institute (branch) of M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Mirny, Russian Federation

✉ zyryanoviv@inbox.ru

Abstract: Designing models of mine ventilation systems requires dedicated software. This article provides practical recommendations for adapting 3D models of ventilation systems in mines for the tasks of mathematical modelling, with the most efficient option of creating a graphical analogue in the AeroSet analytical software suite. The presented material on the combined use (import) of the ventilation functional diagrams from AutoCAD or Micromine graphical design software for better control of the project and its results, as well as for further project progress, which allows for prompt introduction of descriptions of the mine levels in the ore body and permanent workings that require special attention when selecting the parameters of the main ventilation equipment with due account of the mathematical programming algorithms. Designing technical solutions based on numerical modelling using the AeroSet software suite helps optimize capital and operating costs for ventilation in mines, provided that the initial and model parameters used for analyzing the ventilation system match as closely as possible.

Keywords: network model, analytical complex, mine ventilation, extraction scheme, computer modeling, development, air flow, mathematical models of mines

For citation: Kopin S.V., Zyryanov I.V. Adaptation of 3D models of underground mine ventilation systems for mathematical modelling using the AeroSet analytical software application. *Russian Mining Industry*. 2025;(6):82–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-82-87>

Введение

В последнее время разработка сетевых моделей вентиляционных сетей рудников не обходится без специального программного обеспечения, основными или самыми используемыми из которых являются: Flow Vision, VNETPC 2003, Аэросеть, Вентиляция 2.0, VentSim. Кроме этого, существуют и другие комплексы программного обеспечения, но они менее распространены. Для более детализированного анализа отдельных участков горных выработок со значительно неоднородными по сечению потоками воздуха и примесями различных газов техногенного и природного происхождения обычно проводятся расчеты не в рамках сетевых одномерных моделей, а с использованием двухмерного и трехмерного CFD-моделирования. При этом используются программные пакеты: Ansys Fluent, An-sys CFX, SolidWorks и ряд других. Основным ограничением по применению данных программных пакетов является задействование значительных вычислительных мощностей, что позволяет использовать CFD-моделирование, как правило, для локальных участков сети горных выработок, где необходимо детализированное исследование физических процессов [1–3].

Основные задачи

Создание математической модели в среде рассматриваемого аналитического комплекса «АэроСеть» прежде всего предполагает:

- графическое построение схемы выработок объекта моделирования (в данном случае подземного рудника), аналогичной натурной в выбранном масштабе;
- задание соответствующих параметров полученной вентиляционной сети, включая сечения, тип крепи, специфику узлов соединения выработок, вентиляционные сооружения положительного и отрицательного регулирования, размещение оборудования;
- задачей окончательного этапа моделирования является подбор модели вентиляторов главного и вспомогательного назначения.

В случае создания анализируемой схемы выработок на предмет подбора варианта воздухораспределения по её сети существует несколько путей графического построения с помощью набора стандартных опций комплекса:

- создание чертежа в формате задания для каждой выработки «начальной» и «конечной» точки (вершины) с учетом её высотных и линейных натуральных параметров;
- отрисовка по заданным выкопировкам с погоризонтных планов горных работ маркшейдерской службы. Такие графические материалы содержат информацию о подземных горных работах в виде проекций на вертикальную либо горизонтальную плоскости и являются достаточными для обеспечения работ, связанных с пользованием недр;
- экспорт рабочих схем вентиляции из чертежных программ AutoCAD либо Micromine в файлах dxf. Этот тип файла используется для обмена данными чертежей, с помощью которых можно переносить информацию между различными приложениями.

Учитывая существенную трудоемкость операции создания графического построения несмотря на современный интерфейс режимов работы с исходной схемой в комплексе, наибольшего внимания заслуживает загрузка в него уже готовой графики из совместимых компьютерных графических программ. Но даже в этом случае необходима дальнейшая обработка уже импортируемого графического материала для дальнейшей корректной работы с ним.

При создании математической модели требует особого внимания описание горизонтов отработки рудного тела и капитальных выработок на понятном для применяемого аналитического комплекса языке математического программирования. Особое внимание следует уделять соответствию геометрии горных выработок, углам их сопряжения между собой и со вскрывающими капитальными выработками. Некорректное определение данных параметров приводит в дальнейшем при эксплуатации рудников к выбору вентиляционного оборудования с характеристиками, отличными от оптимальных.

Практические рекомендации по адаптации объемных моделей вентиляционных сетей подземных рудников для задач математического моделирования при использовании аналитического комплекса «АэроСеть» для рассматриваемого способа импорта исходной графики представлены в основной части статьи.

Разработка математических моделей рудников

Приложение «АэроСеть» представляет собой достаточно удобную версию для практического применения на промышленных предприятиях и в научно-исследовательских учреждениях, разработки аналитического комплекса. Основная платформа разработки реализована с использованием интегрированной среды ПО для Microsoft Windows на языке Delphi 7. При расчете сетей используются современные численные методы, основами для которых являются: решение систем линейных уравнений; интерполирование и приближённое вычисление функций, численное интегрирование, численное решение системы нелинейных уравнений, численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений, численное решение уравнений в частных производных (уравнений математической физики) и решение задач оптимизации [4–6].

В процессе анализа данных применяются оригинальные вычислительные алгоритмы и схемы, позволяющие значительно улучшить сходимость итерационных схем решения уравнений на основе численного метода решения нелинейных уравнений с преобразованием исходного уравнения в эквивалентное уравнение, которое имеет фиксированную точку. В дальнейшем производится последовательное приближение к этой фиксированной точке, пока не будет достигнута заданная точность. Такой подход позволяет значительно уменьшить время счета [7–9].

Математически описанная проблема формулируется в виде задачи экстремального управления, которая объединяет теоретические обоснования и исследования алгоритмических реализаций методов наиболее эффективного

управления различными системами и решается с помощью одного из методов условной оптимизации: возможных направлений (проектирования градиента, методы Зойтендейка, Вулфа и др.); штрафных, барьерных функций и/или модификации методов безусловной оптимизации.

Приложение имеет возможность использования модуля расчета с учетом конвективно-диффузионных моделей теплопереноса в условиях горного производства, а также на основе оригинальной методики расчета процессов сопряженного нестационарного теплообмена между рудничным воздухом и горным массивом.

Рассмотрим процесс загрузки графики из наиболее распространенных чертежных программ AutoCAD либо Micromine непосредственно в приложение «АэроСеть». Для этого первоначально необходимо провести экспорт рабочих схем вентиляции из них в файлах dxf. Данный тип файла широко используется для обмена исходными чертежами между различными приложениями. Путь для загрузки исходной графической информации в приложение достаточно прост и состоит в следующей последовательности операций: «Файл» – «Добавить» – «Добавить схему из DXF».

Перед построением выработок нужно создать слои, к которым в дальнейшем будут прикреплены разрабатываемые горизонты. Каждый горизонт должен принадлежать отдельному слою. Далее необходимо изменить параметры слоев: задать название, высотную отметку и выбрать цвет слоя. Перед графическим представлением выработок нужно выбрать тот слой из списка, который имеет такую же высотную отметку, что и разрабатываемый горизонт. При добавлении выработок узлам будут автоматически присваиваться высотные отметки слоя. Для построения одного из погоризонтных планов требуется добавить фон. После этого графическое изображение с горизонтом начнет корректно отображаться внутри приложения.

Далее следует разбить схему на отдельные слои по высотным отметкам, то есть объединить выработки на одной отметке. Чтобы программа корректно определила длину выработок, необходимо задать масштаб схемы. Для этого нужно задать фактическое расстояние между двумя узлами, на основе которого будут пересчитаны длины всех выработок.

Выполнив предварительные условия после загрузки, следует учесть, что импортированный графический материал не является моделью в полном смысле этого слова до адекватного соединения его выработок в общую сеть. Это определяется тем, что в приложении существует несколько различий в восприятии программой новой выработки, то есть существуют её «начальная», «конечная» и «висячая» вершины. «Висячая» вершина является промежуточной стадией процесса объединения в общую конфигурацию вентиляционной сети (кроме случаев наличия тупиковых выработок и/или забоев по проекту). Соединение «начальной» вершины с «конечной» вершиной уже существующей выработки технически не вызывает сложностей, но сопряжено с возможными техническими вариантами восприятия операций рисования программой. То есть «висячая» вершина может соединиться с совпадающей по проекции в зависимости от назначения и сложности пересечений аналогичной вершиной, но с другой высотной отметкой. В то же время такое искажение соединения может никак не определяться визуально при работе в выбранной проекции, но приводит при отсутствии корректировки в дальнейшем к отклонению от первоначально заданных параметров моделирования

воздухораспределения по вентиляционной сети рудника.

Для предотвращения подобных ситуаций при адаптации графики в программе следует использовать весь набор проекций, приведенных в приложении. Для математической модели при проектировании и эксплуатации рудника можно выделить следующие участки вентиляционных сетей, требующие особого внимания при моделировании: вскрывающие выработки большого диаметра и значительной протяженности (наклонный и конвейерный съезды); сопряжения основных вскрывающих выработок с горизонтами; вентиляционные восстающие скважины и вентиляционные каналы; а также тупиковые выработки большого сечения и протяженности.

В ряде работ авторов [10–12] описаны способы и подходы к разработке сетевых моделей и решения вышеизложенных задач. Однако в каждом конкретном случае сложности перевода графического языка схем и рисунков на язык программного обеспечения требуют пристального внимания к специфическим узлам соединения главных (капитальных) и второстепенных (подготовительных и нарезных) горных выработок, а также мест их сопряжения с вентиляционным каналом и между собой.

Рассмотрим на примере схемы вскрывающих выработок рудника «Юбилейный» перенос графики в приложение [13]. На рис. 1 представлен исходный графический материал. В случае данного примера основная сложность создания модели состояла в корректном соединении выработок между собой. В частности, к основным сложным элементам адаптации объемной модели вентиляционной сети варианта вскрытия подземных рудников для задач математического моделирования следует отнести:

- выработки со сложной трассой и большой протяженностью;
- узлы соединения капитальной вскрывающей выработки и вентиляционного канала;
- узлы соединения вентиляционной восстающей скважины и основной вскрывающей выработки;
- узлы соединения нескольких выработок и общей вентиляционной выработки.

Выборочные примеры основных сложных узлов сопряжения представлены на рис. 2 и 3.

Как видно на рис. 2, в одной из проекций узел соединения вентиляционной восстающей скважины и основной вскрывающей выработки имеет отклонение от основной плоскости соединения 1. В этом случае на остальных проекциях выработки не имели указанных отклонений.

Для получения адекватного отображения узла соединения вентиляционной восстающей скважины и основной вскрывающей выработки в модели потребовалась корректировка высотной отметки по трассе основной вскрывающей выработки для нивелирования выявленного отклонения. В проблемном соединении выработок использовался вид в прямоугольной проекции.

На рис. 3 приведен пример узла соединения нескольких выработок и общей вентиляционной выработки. Красным цветом с ореолом выделены «висячие» вершины, то есть тупиковые выработки. Между сетью выработок на разных отметках (горизонтах отработки добычного блока) по высоте, при совпадающих проекциях по узлам соединения произошли спонтанные объединения 1. Если охарактеризовать ситуацию более схематично, то разные по высотным отметкам точки (бывшие «начальные» и/или «конечные» вершины), совпадающие по месту расположения на горизонтальных проекциях, объединились в одну.

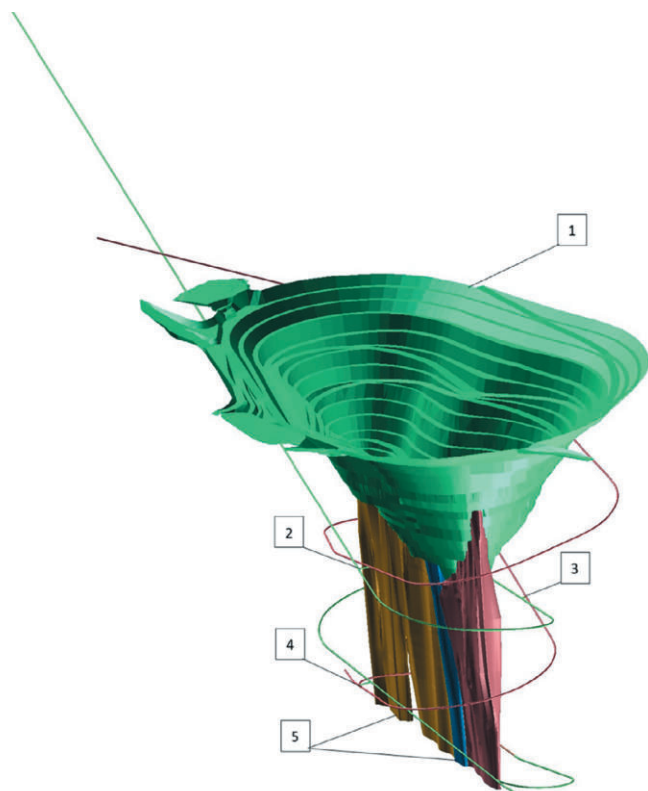


Рис. 1
Схема вскрывающих выработок рудника «Юбилейный» – конвейерного уклона (зеленый цвет) и наклонного съезда (красный цвет):
1 – контур карьера;
2 – сбойка на отметке + 48 м;
3 – сбойка на отметке – 180 м;
4 – сбойка на отметке – 444 м;
5 – рудные тела

Fig. 1
Layout of the main openings at the Yubileiny ore mine: a belt incline (green) and access ramp (red):
1 – the open pit perimeter;
2 – a cross slit at Level +48 m;
3 – a cross slit at Level –180 m;
4 – a cross slit at Level –444 m;
5 – ore bodies

При этом также на проекциях, на которых проводятся сопряжения, не получилось визуально определить данное отклонение от исходной топологии горных выработок.

Для соединения выработок в узлах по слоям использовался вид сверху (в горизонтальной проекции). При корректировке объединения точек потребовалась проверка их интеграции в прямоугольной и косоугольной проекциях. Кроме того, было выполнено выравнивание узла соединения в высотных отметках.

При выполнении аналогичных работ [14] также проводились обязательные проверки правильности соединения в узлах сопряжения выработок во всех проекциях. Специфика корректного отображения в модели узлов объединения точек была идентична.

В ходе моделирования сформировалась устойчивая тенденция, позволившая существенно сократить время создания модели, включающая следующие позиции интеграции узлов в «висячих» вершинах:

- для сложных сочленений по слою и/или между слоями осуществлять их объединение в косоугольных проекциях;
- для менее сложных соединений в узлах возможно использование горизонтальных проекций в работе.

Во всех случаях была необходима периодическая проверка правильности выполненных соединений хотя бы в горизонтальной, прямоугольной и косоугольной проекциях.

Для повышения эффективности выполнения работ по-

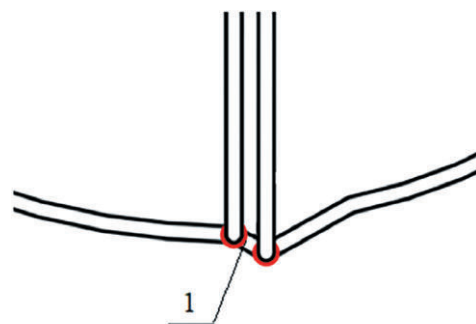


Рис. 2
Узел соединения вентиляционной восстающей скважины и основной вскрывающей выработки в прямоугольной проекции

Fig. 2
A junction between the ventilation raise and the main opening in the rectangular projection

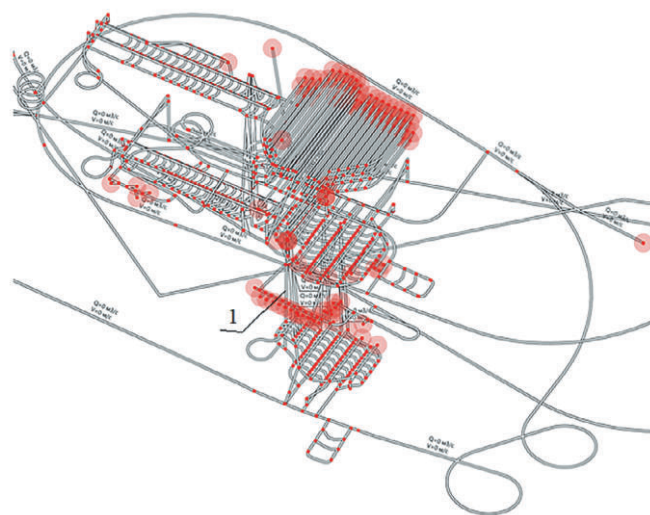


Рис. 3
Узел соединения нескольких выработок и общей вентиляционной выработки в косоугольной проекции

Fig. 3
A junction of several workings and a common ventilation working in the oblique projection

требовалось после каждой серии интеграций проводить создание копий схемы модели. Данная операция позволила сократить время для процесса моделирования в случае некорректного объединения узлов, от которого никто не застрахован. В ходе работ также проводилась периодическая проверка на правильность создания готовой модели не только по слою, но и также включение всех слоев после серии соединений.

Следующей задачей по адаптации графики в приложении является подбор типов крепления выработок, расположение оборудования в капитальных и подготовительных выработках, угла наклона их сопряжений, что позволяет уменьшить капитальные затраты (на покупку вентиляционного оборудования, на строительство надшахтного здания) и эксплуатационные затраты (расход электроэнергии на проветривание) на весь срок отработки рудника. Для этого в приложении имеется справочник типов выработок, который при выборе параметров автоматически создается один раз и в ходе разработки вентиляционной модели многократно используется для различных выработок в соответствии с их назначением.

Для каждого типа выработок задаются название, форма

и площадь поперечного сечения, тип поверхности стенок, максимально допустимая скорость движения воздуха в выработке и специальный цвет, которым будут закрашиваться соответствующие выработки на схеме.

Перед началом расчета распределения воздуха каждой выработке присваивается тип из созданного справочника. В соответствии с выбранным типом выработки автоматически вносятся параметры, от которых зависит сопротивление: площадь сечения, периметр, коэффициент шероховатости.

Для ускорения процесса задания свойств выработок можно выделить все выработки, принадлежащие одному горизонту. Как правило, на рудниках разделение технологического назначения выработок соответствует горизонтам. Для этого модель строится слоями, чтобы в дальнейшем была возможность изменять свойства не одной конкретной выработки, а всего горизонта.

В расчетах математической модели кроме выработок участвуют вентиляционные объекты. К ним относятся перемычки, двери, завалы, вентиляционные паруса и вентиляторные установки. После этого на вентиляционный ствол следует добавить стационарный вентилятор и вентиляционную дверь, имитирующую утечки через надшахтное здание. Данные операции, как правило, не вызывают никаких проблем и достаточно технологичны в процессе ввода, поэтому более подробно в статье не рассматриваются.

В то же время следует учесть [15; 16], что актуальность соответствия модельных и натурных значений аэродинамических сопротивлений главных и второстепенных горных выработок обусловлена потерей основной части депрессии, создаваемой работой главной вентиляционной установки на их преодоление. Основными причинами потери давления при движении воздушного потока по перечисленным выработкам являются шероховатость поверхности, различные препятствия на пути движения воздуха в виде различного оборудования, периодически задействованного в процессе отработки рудного тела, места их сопряжений между собой. Большие объемы воздуха, поступающие в главные воздухоподающие выработки (наклонный и конвейерный съезды, вентиляционные восстающие скважины и места их сопряжения с подготовительными выработками), и определяют характеристики выбора вентиляционного оборудования (вентиляционных агрегатов главного и местного проветривания). В конечном итоге эти решения определяют капитальные и эксплуатационные расходы, понесенные в ходе строительства и эксплуатации горного предприятия.

Заключение

Моделирование схем проветривания и разработка технических решений для обеспечения рабочих зон требуемым количеством воздуха на базе приложения «АэроСеть», включающего комплекс программ, организующих вычислительный процесс в вычислительной среде аналитического комплекса, являются технологически удобным инструментом для оперативного принятия решений как для научных, так и для производственных подразделений предприятия.

Выявленные проблемы адаптации математической модели участков выработок требуют особого внимания при проектировании подземных рудников и выборе вентиляционного оборудования. К основным сложным элементам создания объемных моделей вентиляционных сетей подземных рудников для задач математического моделирования на аналитическом комплексе «АэроСеть» отнесены:

- тупиковые выработки большой протяженности;
- сопряжения «капитальная вскрывающая выработка – вентиляционный канал»;
- сопряжения «вентиляционная восстающая скважина – капитальная вскрывающая выработка»;
- сопряжения «несколько выработок – один узел вентиляционной сети».

Для соединения выработок в узлах по слоям предлагается использовать вид сверху с обязательной проверкой правильности их соединения в прямоугольной и косоугольной проекциях. В проблемных соединениях выработок предпочтительным является применение видов в прямоугольных проекциях. Обязательно проводить выравнивание узла соединения в высотных отметках. Также следует проводить обязательную проверку правильности соединения в узлах и выработках во всех проекциях для окончательной графики модели.

Работа в косоугольных проекциях рекомендуется для сложных соединений по слою и/или между слоями. Для повышения эффективности выполнения работ следует после каждой серии соединений проводить создание промежуточных копий схемы.

Несомненно, что разработка технических решений на основании численного моделирования на базе приложения «АэроСеть» позволяет оптимизировать капитальные и эксплуатационные затраты на организацию проветривания горного предприятия при условии максимального соответствия исходных и модельных параметров, принятых для выполнения анализа вентиляционной сети.

Список литературы / References

1. Каледина Н.О., Романченко С.Б., Трофимов В.А. *Компьютерное моделирование шахтных вентиляционных сетей*. М.: Изд-во Московского гос. горного ун-та; 2004. 72 с.
2. FlowVision 2.5.4. Примеры решения типовых задач. М.: ООО «ТЕСИС»; 2008. 203 с.
3. Aguirre Ponce J.R. Ventilation planning at Minerales Monclova's Mines 7. In: Mutmansky J. M., Ramani R.V. (ed.) *11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, Pennsylvania, USA, 5–7 June 2006*. London: Taylor & Francis Group; 2006, pp. 115–119.
4. Зайцев А.В., Казаков Б.П., Кашников А.В., Кормициков Д.С., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю. и др. *Аналитический комплекс «АэроСеть»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2015610589* Оpubл. 14.01.2015
5. Кобылкин С.С., Сологуб О.В. Обзор существующих средств программного обеспечения для моделирования вентиляции подземных сооружений и шахт. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009;(S13):115–132. Kobylykin S.S., Sologub O.V. Review of the modern software tools for ventilation simulating of underground structures and mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2009;(S13):115–132. (In Russ.)

6. Гришин Е.Л., Кашников А.В., Курилов Д.В., Репин А.В. Разработка единой информационно-аналитической системы вентиляции рудников на основе программно-вычислительного комплекса «Аэросеть». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2010;(S5):71–74.
Grishin E.L., Kashnikov A.V., Kurilov D.V., Repin A.V. Development of a unified information and analytical system for mine ventilation using the AeroSet software and computing suite. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2010;(S5):71–74. (In Russ.)
7. Lutsenko N.A., Fetsov S.S. Effect of side walls shape on charging and discharging performance of thermal energy storages based on granular phase change materials. *Renewable Energy*. 2020;162:466–477. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.029>
8. Gilmore M.S., Beauchamp P.M., Lynch R., Amato M.J. (eds) *Venus Flagship Mission Decadal Study: A Planetary Mission Concept Study Report Presented to the Planetary and Astrobiology Decadal Survey*. Final Report. 8 August 2020. 222 p. Available at: <https://forum.nasaspaceflight.com/index.php?topic=52711.0> (accessed: 29.03.2025).
9. Сулин А.Б., Степанов В.В., Неганов Д.В. Имитационное моделирование процессов переноса радиоактивных и вредных химических веществ в защитных укрытиях на радиационно- опасных предприятиях. В кн.: *7-й съезд по радиационным исследованиям (радиобиология, радиозоология, радиационная безопасность)*, г. Москва, 21–24 октября 2014 г. М.; 2014. С. 386.
10. Qiao W. Analysis and measurement of multifactor risk in underground coal mine accidents based on coupling theory. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021;208:107433. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107433>
11. Копин С.В. Компьютерное моделирование параметров приточно-вытяжной вентиляционной системы. *Безопасность труда в промышленности*. 2020;(2):7–11. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-2-7-11>
Kopin S.V. Computer simulation of the parameters for plenum and exhaust ventilation system. *Occupational Safety in Industry*. 2020;(2):7–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-2-7-11>
12. Круглов Ю.В. *Моделирование систем оптимального управления воздушораспределением в вентиляционных сетях подземных рудников* [Дис. ... канд. техн. наук]. Пермь; 2006. 170 с.
13. Копин С.В., Зырянов И.В. Разработка технических решений по вентиляции для различных схем вскрытия рудного тела рудника «Юбилейный» АК «АЛРОСА» (ПАО). *Горный журнал*. 2025;(5):58–65. <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.05.08>
Kopin S.V., Zyryanov I.V. Ventilation design solutions for different access ways to ore body in ALROSA's Yubileiny Mine. *Gornyi Zhurnal*. 2025;(5):58–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.05.08>
14. Копин С.В. Обоснование дебита свежего воздуха для нижних горизонтов рудника «Интернациональный» АК «АЛРОСА» (ПАО). *Безопасность труда в промышленности*. 2024;(2):76–81. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2024-2-76-81>
Kopin S.V. The Substantiation of Fresh Air Flow Rate for Lower Horizons of the “International” Mine of ALROSA Diamond-Mining Company (PJSC). *Occupational Safety in Industry*. 2024;(2):76–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2024-2-76-81>
15. Yu J., Li Z., Wang W. Influence of gas outburst dynamic flow on mine ventilation system. *AIP Advances*. 2021;11(7):075223. <https://doi.org/10.1063/5.0052080>
16. de Vilhena Costa L., da Silva J.M. Cost-saving electrical energy consumption in underground ventilation by the use of ventilation on demand. *Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy*. 2020;129(1):1–8. <https://doi.org/10.1080/25726668.2019.1651581>

Информация об авторах

Копин Сергей Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-5780-411X>; e-mail: mobil1111@mail.ru

Зырянов Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, Мирнинский политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, Республика Саха (Якутия), г. Мирный, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-2943-0138>; e-mail: Zyryanoviv@inbox.ru

Information about the authors

Sergey V. Kopin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Institute “Yakutniproalmaz”, ALROSA PJSC, Mirny, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-5780-411X>; e-mail: mobil1111@mail.ru

Igor V. Zyryanov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Mirny Polytechnic Institute (branch) of M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-2943-0138>; e-mail: Zyryanoviv@inbox.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 08.09.2025

Поступила после рецензирования: 23.10.2025

Принята к публикации: 30.10.2025

Article info

Received: 08.09.2025

Revised: 23.10.2025

Accepted: 30.10.2025