

Литература

1. Методика автоматизированного восстановления изображений с использованием сверточных нейронных сетей / Г. А. Хришкевич, Д. А. Андреев, Л. В. Мотайленко [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 6 (242). – С. 65–76. – DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-65-76
2. Хришкевич, Г. А. Вариационная модель цифровой реставрации монументальной живописи [Электронный ресурс] / Г. А. Хришкевич // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 12. – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2025/10627>.
3. Mishra, M. Artificial intelligence-assisted visual inspection for cultural heritage: State-of-the-art review / M. Mishra, P. B. Lourenço // Journal of Cultural Heritage. – 2024. – Vol. 66. – P. 536–550. – DOI: 10.1016/j.culher.2024.01.005
4. Yeung, M. Unified Focal loss: Generalising Dice and cross entropy-based losses to handle class imbalanced medical image segmentation / M. Yeung, E. Sala, C. B. Schönlieb, L. Rundo // Computerized Medical Imaging and Graphics. – 2022. – Vol. 95. – Article 102026. – P. 1–53. – DOI 10.1016/j.compmedimag.2021.102026

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ В СИСТЕМЕ РУДНИЧНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ КАК ЭЛЕМЕНТ ЦИФРОВИЗАЦИИ ГОРНЫХ РАБОТ

К. С. Короленок

Белорусский государственный университет, г. Минск

Научный руководитель М. А. Журавков

Рассмотрены вопросы математического моделирования аэродинамических процессов в системе рудничной вентиляции в условиях подземных калийных рудников. Приведен анализ существующих подходов к расчету распределения воздушных потоков в разветвленных сетях подземных выработок. Обоснована необходимость разработки комбинированного подхода, сочетающего классические методы теории вентиляционных сетей с алгоритмами адаптации к конкретным условиям производства. Определены направления дальнейших исследований, включающие создание эффективных численных методов и интеграцию разрабатываемых моделей в корпоративные информационные системы.

Ключевые слова: рудничная вентиляция, CFD-моделирование, воздухораспределение, математическая модель, аэродинамическое сопротивление.

Система вентиляции является критически важным элементом инфраструктуры любого подземного рудника или шахты. От ее надежности и эффективности напрямую зависят безопасность труда горнорабочих, предотвращение аварийных ситуаций, связанных с накоплением взрывоопасных газов, а также энергетическая эффективность всего горнодобывающего предприятия в целом. Согласно статистике, до 30–40% всей потребляемой шахтой электроэнергии приходится именно на работу вентиляторных установок главного и местного проветривания [1].

Современные тенденции развития горной отрасли неразрывно связаны с процессами цифровизации и внедрения элементов Индустрии 4.0. Крупные горнодобывающие компании переходят к использованию корпоративных информационных систем, которые объединяют в себе геологическое моделирование, планирование горных работ, диспетчеризацию и контроль безопасности. В этих условиях система рудничной вентиляции не может оставаться изолированным элементом — она должна быть интегрирована в общую цифровую экосистему предприятия, чтобы обеспечивать актуальными данными смежные подразделения и получать от них информацию для корректировки своих параметров.

Вместе с тем, на практике зачастую имеет место ситуация, когда существующие подходы к моделированию вентиляции и проветриванию выработанного пространства либо носят узкоспециализированный характер (рассчитаны на решение какой-то одной локальной задачи), либо представляют собой слишком сложные CFD-модели (вычислительная гидродинамика), которые, в свою очередь, требуют огромных вычислительных ресурсов и не могут работать в режиме реального времени для оперативного управления.

Анализ литературных источников показывает, что исторически сложилось несколько подходов к моделированию рудничной вентиляции [2, 3].

Первый и самый простой подход – аналитические методы, основанные на законах сохранения массы и энергии для отдельных ветвей сети. Так, например, уравнение Бернулли для шахтных вентиляционных сетей имеет вид:

$$h = RQ^2,$$

где h – депрессия (потери давления) на участке; R – аэродинамическое сопротивление участка, Q – расход воздуха. Для последовательного и параллельного соединения выработок применяются правила «сложения сопротивлений». Однако такой подход применим только для простейших схем и не позволяет рассчитывать сложные разветвленные сети с большим количеством узлов и перемычек.

Второй подход – метод узловых потенциалов. Суть метода заключается в составлении системы уравнений для каждого узла сети на основе первого закона Кирхгофа (алгебраическая сумма расходов воздуха в узле равна нулю) и последующем решении построенной системы относительно неизвестных давлений в узлах. Достоинство метода – относительная простота программной реализации. Недостаток – возникновение трудностей при наличии в сети вентиляторов с нелинейными характеристиками.

Третий подход – метод контурных расходов (или метод Харди Кросса), который широко применяется при расчете гидравлических и вентиляционных сетей. Для каждого независимого контура записывается уравнение баланса депрессий (второй закон Кирхгофа), и затем итерационным путем уточняются значения расходов в ветвях. Этот метод хорошо зарекомендовал себя при расчете кольцевых сетей, но его сходимость сильно зависит от начального приближения и топологии сети.

Четвертый подход – использование CFD-моделей, которые решают полные уравнения Навье-Стокса для турбулентных течений. Такие модели дают наиболее детальную картину распределения скоростей и давлений, позволяют учитывать локальные особенности геометрии выработок. Но, CFD-моделирование требует построения качественной конечно-элементной или конечно-объемной сетки, задания большого количества граничных условий и обладает высокой вычислительной трудоемкостью [4]. Для оперативного управления горными работами такой подход малопригоден.

Таким образом, наиболее перспективным для решения задач оперативного управления и оптимизации представляется комбинированный подход, сочетающий в себе методы теории вентиляционных сетей (методы узловых потенциалов и контурных расходов) с элементами адаптации под конкретные условия горнодобывающего предприятия.

Одной из ключевых особенностей реальных вентиляционных систем является их динамичность. По мере отработки запасов полезного ископаемого появляются новые выработки, старые участки могут погашаться или изолироваться. Соответственно, топология сети меняется.

Для учета этих изменений в модели предлагается использовать модульный принцип построения. Согласно данному подходу, вся вентиляционная сеть разбивается на типовые элементы (ствол, квершлаг, штрек, орт, восстающий и т.д.), для каждого из которых задаются аналитические зависимости сопротивления от геометрических параметров. В этом случае, при изменении конфигурации сети перестраивается не вся модель целиком, а лишь соответствующий набор элементов.

Наиболее важными для практики являются две задачи оптимизации:

Оптимизация по критерию энергоэффективности. Требуется найти такие режимы работы вентиляторов главного проветривания и регулирующих устройств (перемычек, дверей, шлюзов), чтобы при обеспечении требуемых расходов воздуха во всех забоях суммарное энергопотребление было минимальным. Это задача нелинейного программирования с ограничениями, для решения которой могут быть использованы градиентные методы или методы случайного поиска.

Оптимизация по критерию безопасности. В аварийных ситуациях (например, при возникновении пожара или выброса метана) требуется быстро перераспределить воздушные потоки таким образом, чтобы максимально быстро удалить опасные газы из рабочих зон и не допустить их попадания в места нахождения людей. Здесь уже требуется решать обратную задачу: по желаемому распределению концентраций найти необходимое управляющее воздействие.

Современные тенденции развития горной отрасли, связанные с цифровизацией и внедрением корпоративных информационных систем, диктуют необходимость интеграции вентиляционных расчетов в единую цифровую экосистему предприятия. Это требует разработки новых подходов, способных сочетать достаточную точность с возможностью быстрой адаптации к изменяющимся условиям. Поэтому, направления дальнейших исследований включают разработку эффективных численных методов решения больших систем нелинейных уравнений, создание алгоритмов оптимизации режимов работы и реализацию программных модулей для интеграции в корпоративные информационные системы.

Литература

1. Козырев, С. А. Управление вентиляционными потоками в горных выработках подземных рудников на основе математического моделирования аэродинамических процессов / С. А. Козырев, А. В. Осинцева, П. В. Амосов. – Апатиты : Кол. науч. центр Рос. акад. наук, 2019. – 114 с.
2. Левин, Л. Ю. Увеличение энергоэффективности систем вентиляции калийных рудников путем реализации последовательного проветривания камер служебного назначения / Л. Ю. Левин, А. Е. Суханов, А. Г. Исаевич // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 4. – С. 93–106.
3. Мальцев, С. В. Разработка способов повышения эффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции / С. В. Мальцев, Б. П. Казаков, М. А. Семин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – № 4. – С. 283–291.
4. Кашников, А. В. Нечеткое управление главной вентиляторной установкой и автоматическими регуляторами в системах проветривания рудников / А. В. Кашников, Л. Ю. Левин // XXII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2019) : сб. докл. – СПб. : ЛЭТИ, 2019. – С. 128–131.
5. Оценка влияния динамики движения воздушных потоков в шахтном стволе на параметры движения элементов шахтного подъемного комплекса / М. А. Журавков, М. А. Николайчик, И. Н. Карпович // Разрушение горных пород и минералов : сб. материалов второй всерос. конф., Екатеринбург, 1–2 апр. 2025 г. – Екатеринбург : Урал. гос. гор. ун-т, 2025. – С. 31–32.