УДК 622.45

Автоматизированное управление вентиляцией шахт и рудников. Проблемы, современный опыт, направления совершенствования

М.А.СЕМИН , Е.Л.ГРИШИН, Л.Ю.ЛЕВИН, А.В.ЗАЙЦЕВ

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

Как цитировать эту статью: Автоматизированное управление вентиляцией шахт и рудников. Проблемы, современный опыт, направления совершенствования / М.А.Семин, Е.Л.Гришин, Л.Ю.Левин, А.В.Зайцев // Записки Горного института. 2020. Т. 246. С. 623-632. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4

Аннотация. Статья разделена на три основные части. В первой части приводится обзор существующей литературы по теоретическим методам расчета оптимального воздухораспределения в шахтах по критериям энергоэффективности и обеспечения всех участков шахт требуемым количеством воздуха. Показано, что к текущему моменту времени имеется множество различных постановок задачи поиска оптимального воздухораспределения, разработано множество различных подходов и методов оптимизации воздухораспределения. Наиболее полно исследован случай одной (главной) вентиляционной установки, в то время как для множества вентиляторных установок ряд вопросов по-прежнему остается нерешенным.

Вторая часть посвящена обзору существующих методов и примеров внедрения систем автоматизированного управления проветриванием на шахтах в России и за рубежом. Выделено две наиболее известные концепции разработки таких систем – системы автоматизированного управления проветриванием (САУП) в России и странах СНГ и Ventilation on demand (VOD) за рубежом. Описаны основные стратегии управления вентиляцией в рамках концепций САУП и VOD, а также показаны ключевые различия между ними. Одним из ключевых различий между САУП и VOD на сегодня является автоматическое определение параметров работы вентиляторных установок и вентиляционных дверей с помощью алгоритма оптимального управления, являющегося составным элементом САУП.

В третьей части статьи представлено описание алгоритма оптимального управления, разработанного коллективом Горного института Уральского отделения Российской академии наук при участии авторов статьи. В данном алгоритме поиск оптимального воздухораспределения осуществляется системой в полностью автоматизированном режиме в реальном времени с помощью алгоритмов, запрограммированных в микроконтроллеры вентиляторных установок и вентиляционных дверей. Минимизация энергопотребления достигается за счет наиболее эффективного подбора частот оборотов вентиляторных установок и степени открытия вентиляционных дверей, а также за счет посменного регулирования воздухораспределением и внедрения систем частичного повторного использования воздуха.

Отмечено, что в настоящее время в имеющейся литературе слабо освещен вопрос, связанный с аварийными режимами работы систем вентиляции шахт и рудников, а также с адаптацией систем автоматизированного управления на произвольные варианты вскрытия, подготовки и систем разработки месторождений. По мнению авторов, дальнейшее развитие систем автоматизированного управления вентиляцией должно осуществляться, в частности, по этим двум направлениям.

Ключевые слова: рудничная вентиляция; воздухораспределение; оптимальное управление; автоматизированное управление; вентиляция по требованию

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-77-30008).

Введение. Основной задачей любой системы подземной вентиляции, согласно работе [39], является обеспечение всех рабочих зон (или всех потребителей) воздухом в достаточном количестве и достаточного качества для разбавления загрязняющих веществ до безопасных концентраций. На первый взгляд эта задача кажется легко разрешимой. Однако по мере того, как шахты и рудники становятся все более глубокими и разветвленными, повышается температура воздуха в удаленных рабочих зонах, усложняется процесс доставки свежего воздуха до конечного потребителя, увеличиваются объемы выделяющихся газов при ведении горных работ. Вследствие этого выполнение основной задачи системы вентиляции усложняется [42].

Обеспечение всех рабочих зон необходимым количеством свежего воздуха не является единственной задачей вентиляции. К системам вентиляции шахт и рудников все чаще предъявляется требование энергоэффективности [17]: суммарное потребление электроэнергии должно быть минимальным. Это требование является логичным с точки зрения концепции бережливого производства [44]. Главный принцип бережливого производства заключается в сокращении всех действий, не добавляющих ценности продукту, на всем его жизненном цикле. По разным оценкам,

доля общих затрат электроэнергии, приходящейся на системы вентиляции и воздухоподготовки шахт и рудников, варьируются в диапазоне 30-70 % [18, 29, 30, 42].

В основе двух указанных задач систем вентиляции лежат два противоборствующих критерия: при решении задачи по обеспечению воздухом подразумевается увеличение расхода воздуха в вентиляционной сети, а вторая задача направлена на его максимально возможное снижение. Рациональное решение обеих задач систем вентиляции, позволяющее определить оптимальное распределение воздушных потоков по вентиляционной сети по критериям энергоэффективности и разбавления загрязняющих веществ, возможно только с применением методов теории оптимального управления. А реализация оптимального распределения воздушных потоков на практике в условиях динамически изменяющихся вентиляционных сетей шахт и рудников возможна только с использованием средств автоматического управления проветриванием [8].

Настоящая статья посвящена анализу существующей литературы как по методам оптимального управления воздухораспределением в шахтах и рудниках, так и по внедрению систем управления вентиляцией на практике. Представленный в статье анализ важен для понимания текущего состояния и направлений дальнейшего развития теоретических и технических средств управления вентиляцией шахт. Также в статье подробно описан алгоритм оптимального управления вентиляционными устройствами на шахтах и рудниках.

Методы и алгоритмы оптимального управления воздухораспределением. При разработке и внедрении систем управления вентиляцией на шахтах и рудниках прежде всего необходимо определить оптимальный режим вентиляции рудника, к обеспечению которого будет стремиться рассматриваемая система управления. Под оптимальным режимом вентиляции, как правило, понимается такой режим, при котором выполняются условия:

- минимальная мощность, потребляемая всеми вентиляторными установками вентиляционной сети шахты или рудника,

$$N = \sum_{i=1}^n \frac{H_i Q_i}{\eta_i} \rightarrow \min; \quad (1)$$

- обеспеченность всех рабочих зон требуемым количеством воздуха

$$Q_j \geq Q_j^*, \quad j = 1, \dots, m, \quad (2)$$

где индекс i нумерует вентиляторные установки; индекс j нумерует рабочие зоны; n – количество вентиляторов; m – количество рабочих зон; Q – расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; H – депрессия вентиляторной установки; η – коэффициент полезного действия вентиляторной установки; Q^* – расход воздуха в рабочей зоне, требуемый для разбавления вредных примесей и обеспечения комфортного микроклимата, $\text{м}^3/\text{с}$.

В качестве оптимизационных параметров при минимизации функционала (1) при условиях (2), как правило, используются аэродинамические сопротивления горных выработок и депрессии вентиляторов [15]. Изменение аэродинамического сопротивления горных выработок может происходить за счет изменения параметров вентиляционных сооружений, находящихся в них, а изменение депрессии вентиляторов – за счет изменения частот оборотов рабочих колес, углов поворота лопаток рабочих колес или направляющих аппаратов [8, 11].

Проблема оптимального управления проветриванием шахт и рудников сформулирована достаточно давно. Впервые задачи подобного рода рассмотрены в СССР в монографиях [1, 11, 19]. В монографии [11] предложен глобальный критерий оптимального проветривания шахты, учитывающий капитальные затраты на развертывание системы управления проветриванием, а также, помимо условий (2), рассмотрены дополнительные условия оптимальности: концентрации вредных примесей не должны превышать соответствующих предельно допустимых значений, т.е. помимо условия (2) записывается условие вида:

$$C_j \leq C_j^*, \quad j = 1, \dots, m, \quad (3)$$

где C_j^* – предельно допустимое значение концентрации вредных примесей в атмосфере горной выработки j .

С точки зрения теоретических расчетов условия (2) и (3) чаще всего эквивалентны, поскольку предварительный расчет требуемых расходов воздуха Q^* производится исходя из предельно допустимых величин концентраций вредных примесей в атмосфере горных выработок C^* . Однако при развертывании алгоритмов оптимального управления воздухораспределением на шахтах и рудниках условия (2) и (3) перестают быть эквивалентными, так как их проверка осуществляется экспериментально с использованием датчиков, измеряющих принципиально различные физические величины.

Также в монографии [11] впервые описано, что при достижении оптимального режима проветривания шахты или рудника вентиляционное сооружение самого трудно проветриваемого воздушного тракта должно иметь нулевое аэродинамическое сопротивление.

В монографии [19] сформулирован критерий оптимальности управления вентиляционной сетью, предложен метод оптимального управления вентиляционной сетью, основанный на линеаризации с последующим применением симплекс-метода, а также впервые рассмотрена задача нахождения оптимальных схем вентиляционных сетей. В монографии [11] задача оптимального управления проветриванием решается также с помощью методов линейного программирования. В этой монографии рассмотрена частная задача оптимального управления при заданных расходах во всех выработках вентиляционной сети. По мнению авторов источников [8, 22], методы линейного программирования имеют медленную сходимость и зачастую расходятся, так как в общем случае рассматриваемая задача оказывается невыпуклой.

Впоследствии идеи оптимального управления были развиты в монографии [15], в которой сформулирована обобщенная задача оптимального управления проветриванием шахт и рудников, позволяющая учитывать различные ограничивающие условия и критерии оптимума. Рассмотрены различные алгоритмы решения задачи оптимального управления на основе метода Ньютона, метода итераций и метода наискорейшего спуска. Проведено обобщение и объединение этих методов в единый гибкий алгоритм поиска оптимального режима проветривания. Идея данного алгоритма заключается в аддитивном учете различных условий задачи и условий экстремальности при формировании матрицы Гессе.

В зарубежной литературе активное исследование проблемы оптимального управления проветриванием шахт и рудников началось позднее – в конце 80 – начале 90-х гг. прошлого века. В это время в работах [24, 26, 31, 32, 34, 43, 45] были описаны различные математические методы и подходы к минимизации энергопотребления шахтных вентиляционных сетей. В этих исследованиях также преимущественно рассматриваются методы линейного программирования (сетевой симплекс-метод). Помимо этого метода в статье [45] рассматривается метод критического пути (CPM), основанный на выделении в вентиляционной сети пути наибольшего аэродинамического сопротивления.

В зарубежных исследованиях под задачей оптимизации воздухораспределения в вентиляционной сети рудника или шахты, как правило, рассматривается более общая задача. В рамках этой задачи требуется идентифицировать количество, расположение и режим работы вентиляторов и регуляторов [22], в то время как в российской литературе обычно принимается, что отрицательные регуляторы находятся в фиксированном наборе выработок, где известны (заданы) расходы воздуха [1, 5, 8]. Так, например, в работах [24, 32] определяются места расположения положительных регуляторов (вентиляторных установок) и отрицательных регуляторов (вентиляционных дверей и окон) в вентиляционной сети. В работе [26] рассматривается задача подбора оптимальных мест только положительных регуляторов.

Современные исследования по данному вопросу направлены на разработку новых численных методов оптимизации воздухораспределения на шахтах и рудниках произвольной топологии. В работе [27] задача оптимального проветривания шахты решена с помощью последовательного решения задач квадратичного программирования, аппроксимирующих исходную задачу оптимизации. В работе [37] предложен метод асимптотических расчетов расходов воздуха для определения положений и сопротивлений отрицательных регуляторов в вентиляционной сети. В этом методе набор выработок с регуляторами определяется исходя из предложенной матрицы ориентированных путей. В работах [4, 13, 21, 38] для решения задачи оптимального размещения отрицательных регуляторов и последующего распределения воздушных потоков в рудничной вентиляционной сети используются генетические алгоритмы. В работе [6] предложен оптимизаци-

онный алгоритм, осуществляющий предварительный «разгон» главной вентиляторной установки до такой частоты оборотов рабочего колеса, при которой впервые начнут выполняться условия (2). Далее происходит итеративное снижение частоты оборотов, сопровождающееся перераспределением воздушных потоков в вентиляционной сети посредством отрицательных регуляторов. Перераспределение воздушных потоков выполняется путем решения оптимизационной задачи с помощью модифицированного многомерного метода Ньютона.

Практически ни в одном из существующих исследований оптимальных режимов проветривания шахт и рудников не доказывается, что найденное решение является глобальным оптимумом. Исключением являются исследования [8, 11]. В данных работах предложены схожие алгоритмы поиска оптимального режима проветривания посредством управления параметрами отрицательных и положительных регуляторов. Для случая единственной главной вентиляторной установки строго доказывается, что полученное решение соответствует оптимуму (1)-(2).

Отдельным классом методов оптимального распределения воздушных потоков является решение обратных задач воздухораспределения, впервые примененных к задачам шахтной и рудничной вентиляции в работах [5 10]. Идея заключается в том, что система уравнений Кирхгофа I и II рода, переопределенная за счет дополнительных условий вида (2), дополняется новыми неизвестными – депрессиями [5] или дополнительными сопротивлениями [10] в ветвях с заданным расходом воздуха Q^* .

Системы автоматизированного управления воздухораспределением. Система автоматизированного управления воздухораспределением в шахтах и рудниках является более широким понятием по сравнению с алгоритмами оптимального управления воздухораспределением, поскольку также включается в себя технические средства, осуществляющие сбор информации о параметрах атмосферы выработок, передачу информации на сервера и вычислительные блоки, хранение информации и ее графическое отображение на рабочем месте диспетчера. В этот список также следует включить технические средства и алгоритмы микроконтроллеров, позволяющие в режиме реального времени изменять параметры положительных и отрицательных регуляторов (например, частоты оборотов рабочих колес вентиляторных установок, углы поворота створок вентиляционных дверей).

Первым трудом, в котором достаточно полно описаны теоретические основы построения систем автоматизированного управления воздухораспределением в вентиляционных сетях шахт и рудников, является монография [11]. В ней выделены три основные операции, выполняемые такими системами (сбор информации, обработка информации и исполнение решений), а также приведена классификация различных методов выполнения этих операций.

Классификация методов выполнения основных операций систем автоматизированного управления воздухораспределением:

1. Сбор информации:

- а) вручную;
- б) автоматизированно (с помощью стационарных датчиков).

2. Обработка информации:

- а) вручную без применения специальных вычислительных устройств;
- б) с применением специальных вычислительных устройств (на компьютерной модели вентиляционной сети); исходные данные вводятся вручную;
- в) автоматизированно при помощи компьютерной модели вентиляционной сети, сопряженной с системой сбора информации;
- г) автоматизированно при помощи алгоритмов микроконтроллеров, сопряженных как с системой сбора информации, так и с регуляторами вентиляционных устройств.

3. Исполнение решений:

- а) вручную на месте;
- б) вручную дистанционно (из диспетчерской);
- в) автоматически.

Под обработкой информации понимается определение ошибки управления по расходам и (или) концентрациям газов и расчет необходимых управляющих воздействий для положительных и отрицательных регуляторов. Под исполнением решений понимается непосредственное изменение рабочих режимов положительных и отрицательных регуляторов.

Ситуация полностью ручного управления вентиляцией шахты соответствует режим «а-а-а», в то время как полностью автоматическое управление соответствует режиму «в-г-в». Остальные режимы представляют собой автоматизированное управление, где какая-либо часть операций выполняется человеком.

В монографии [11] проведена классификация подходов к автоматизированному управлению проветриванием. Выделено два направления, ключевое отличие между которыми заключается в способе расчета оптимальных параметров положительных и отрицательных регуляторов – посредством решения задачи оптимального управления воздушораспределением или с помощью методов теории автоматического регулирования.

В рамках первого направления предполагается, что топология и геометрические параметры системы выработок известны, имеется компьютерная модель вентиляционной сети, на которой специалист автоматически производит численный расчет оптимального воздушораспределения в шахте и получает требуемые параметры вентиляционных устройств (производительности вентиляторов, сопротивления вентиляционных сооружений). В рамках второго направления топология и геометрические параметры вентиляционной сети могут быть неизвестны, а управляющие воздействия на регуляторы вентиляционных устройств определяются микроконтроллерами, исходя из их текущих значений и отклонений фактических значений управляемых величин (расходов воздуха, концентраций газов) от требуемых и (или) критических значений.

Также в монографии [11] предложена классификация вентиляционных сетей на легкоуправляемые и трудноуправляемые. Критерий отнесения вентиляционной сети к трудноуправляемой следующий: если среди элементарных циклов полного графа вентиляционной сети имеется хотя бы один цикл, не содержащий ни одного объекта управления проветриванием и включающий две или более вентиляторных установки. В дальнейшем похожая классификация приводилась в работе [10], где под сложными системами вентиляции понимаются системы вентиляции, имеющие две или более вентиляторные установки с различными зонами аэродинамического влияния.

В монографии [15] введен термин системы автоматизированного управления проветриванием (САУП), который в дальнейшем нашел широкое применение в российской научной литературе [3, 8, 7, 14]. Приведена обобщенная структура САУП шахт и рудников, включающая в себя элементы, отвечающие за следующие основные функции:

- сбор информации о состоянии шахтной атмосферы и технических средств;
- анализ состояния проветривания и расчет управляющих воздействий технических средств;
- отображение информации о состоянии проветривания и исправности технических средств;
- отработка управляющих воздействий техническими средствами.

Данная классификация схожа с классификацией основных операций, предложенной в монографии [11]. Основным отличием является то, что операция по обработке информации в монографии [15] разделена на две функции, первая осуществляет все внутренние расчеты параметров вентиляции и оценку состояния системы, а вторая предназначена для коммуникации с оператором, сообщения ему основных сведений о состоянии системы вентиляции и технических средств управления.

Для определения оптимальных значений регуляторов авторы решают задачу оптимального управления воздушораспределением на компьютере. Вывод каждого из регуляторов в оптимальный режим работы осуществляется посредством сообщения на привод регулятора управляющих воздействий по пропорционально-интегральному закону регулирования. В монографии [15] указывается, что расчет управляющих воздействий может производиться различными способами: по коэффициентам обеспеченности рабочих зон воздухом, по отклонению расходов воздуха от требуемого значения, посредством более комплексных показателей безопасного проветривания, учитывающих концентрации газов, температуры воздуха и др. Наиболее гибкой системой, по мнению авторов, является система, сочетающая в себе все возможные варианты алгоритмов управления. Однако при этом, как отмечено в монографии [11], важно учитывать разноинерционность аэродинамических и газодинамических процессов. Разноинерционность связана, в первую очередь, с тем, что для аэродинамических процессов скорость переноса возмущений равна скорости звука в воздухе, в то время как для газодинамических процессов – средней скорости движения воздуха в рассматриваемой горной выработке.

В последнее десятилетие за рубежом активно развивается принцип вентиляции «по требованию» или VOD (Ventilation on demand). Этот термин впервые упоминается в работах [30, 41]. Согласно определению, данному в [40], вентиляция «по требованию» – это такое обустройство системы вентиляции, при котором свежий воздух направляется только на те участки шахты или рудника, где он требуется, в количестве, необходимом для ведения горных работ и поддержания комфортных условий труда в течении заданного промежутка времени (например, периода времени добычной смены). Таким образом, концепция вентиляции «по требованию» заключается в подаче свежего воздуха преимущественно в те рабочие зоны, в которых ведутся горные работы, при этом в оставшейся части рудника расходы воздуха должны быть минимизированы [42]. За счет этой минимизации расхода воздуха достигается экономия электроэнергии.

В работе [42] выделяется три глобальных стадии VOD:

- дистанционное управление проветриванием;
- автоматизированное посменное управление проветриванием;
- полностью динамическая система управления (воздушный поток постоянно контролируется и регулируется на основе знания местоположения оборудования и проводимых горных работ в режиме онлайн).

В работе [40] представлена альтернативная, более дифференцированная классификация, включающая пять стратегий VOD:

- 1) дистанционное управление проветриванием;
- 2) автоматизированное посменное управление проветриванием;
- 3) реагирование на возможные события;
- 4) позиционирование;
- 5) комфортность окружающей среды.

Первая стратегия, как это следует из названия, позволяет осуществлять ручное (дистанционное) управление или настройку рабочих точек для различных технических средств системы вентиляции.

Вторая реализует принцип посменного регулирования расходов воздуха в шахте – запуска различных заранее рассчитанных уставок Q^* для каждого из положительных и отрицательных регуляторов в соответствии с определенным графиком ведения горных работ в различных участках шахты.

Третья стратегия подразумевает автоматический запуск предписанных действий в ответ на определенные произошедшие и зарегистрированные системой датчиков события (превышение предельно допустимых концентраций газов, задымление выработок и др.). Данная стратегия необходима для автоматизации аварийного проветривания.

Четвертая стратегия – это позиционирование горнорабочих и оборудования. Она требует внедрения системы датчиков местоположения и связанного с ними программного обеспечения для визуализации актуальных координат горнорабочих и оборудования на вентиляционной сети шахты. Расчет требуемого количества воздуха и его доставка до каждой рабочей зоны шахты в этом случае определяется исходя из фактической численности персонала и количества единиц оборудования каждого типа в этой рабочей зоне.

Пятая стратегия контроля связана с комплексным обеспечением комфортных условий работы в рабочей зоне по таким факторам как газ, пыль, содержание твердых частиц от работы дизельных двигателей (DPM), ощущаемая температура и др. Автоматическое управление в этом случае должно основываться на комплексном наборе данных об окружающей среде, считываемых с соответствующих датчиков в режиме реального времени. Ключевое отличие пятой стратегии от предшествующих ей – управление вентиляционными устройствами по измеренным параметрам атмосферы «напрямую», без использования базы данных с требуемыми расходами воздуха, заранее рассчитанными по принятой на шахте методике.

Если в статье [42] подразумевается последовательное улучшение системы вентиляции шахты по пути от первой стадии к третьей, то в классификации статьи [40] такого ограничения нет: улучшение системы вентиляции шахты может происходить посредством реализации различных стратегий из этого списка в произвольном порядке. Далее будет использоваться классификация статьи [40].

Если провести сравнение классификации систем управления проветривания, приведенной в таблице монографии [11], и классификации стратегий VOD, то можно сделать вывод, что VOD соответствует системам управления вентиляцией с наборами методов «б-б-б» и выше. При этом четвертая стратегия VOD (позиционирование) в российской литературе, как правило, рассматривается отдельно – применительно к вопросам безопасности и оповещения о различных аварийных ситуациях [2, 16]. В этом смысле можно принять, что четвертая стратегия в российской литературе объединяется с третьей.

Наиболее экономически эффективный набор стратегий управления вентиляцией для каждой шахты определяется индивидуально с учетом уникальных характеристик каждой шахты [11, 40].

В зарубежной литературе представлено множество исследований внедрения стратегий VOD на различных шахтах и рудниках [23, 25, 20], а также исследований, посвященных обоснованиям экономической эффективности стратегий VOD в условиях конкретных шахт и рудников до их непосредственного внедрения [28, 29, 40]. Чаще всего описываются случаи внедрения только второй стратегии VOD – автоматизированного посменного управления проветриванием [20, 25].

На горнорудных предприятиях России и стран СНГ в последнее десятилетие активно внедряется стратегия управления проветриванием, предложенная в работах [7, 8]. Данная стратегия является аналогом VOD, но имеет два ключевых отличия:

1) минимизация энергопотребления достигается не только за счет посменного регулирования воздухораспределения, но также за счет внедрения систем частичного повторного использования воздуха;

2) поиск оптимального воздухораспределения осуществляется системой в полностью автоматизированном режиме с помощью алгоритмов, запрограммированных в микроконтроллеры вентиляторных установок и вентиляционных дверей.

Первое отличие имеет место только для рудных месторождений, поскольку применение рециркуляционного проветривания на угольных шахтах запрещается правилами безопасности. По оценкам авторов статьи [9], снижение энергопотребления при введении САУП с частичным повторным использованием воздуха на калийных рудниках ОАО «Беларуськалия» и ПАО «Уралкалия» может достигать 70 %.

Второе отличие становится возможным благодаря разработанному в работе [8] алгоритму управления вентиляционными устройствами для случая вентиляционных сетей произвольной топологии с одной главной вентиляторной установкой в режиме реального времени.

Алгоритм оптимального управления вентиляционными устройствами САУП. В основе алгоритма управления лежит набор общих правил, которые формулируются для автоматических вентиляционных дверей (АВД) и главной вентиляторной установки (ГВУ).

Правила управления каждой АВД:

- АВД будет открываться тогда, когда либо в ней самой, либо хотя бы в одной из связанных с ней последовательных АВД имеется недостаточный расход;
- АВД будет закрываться, если хотя бы в одной, связанной с ней, параллельной АВД, будет недостаточный расход.

Если все АВД, последовательные данной АВД, имеют избыточный расход, и при этом в данной АВД тоже имеет место избыточный расход, то следует закрывать данную АВД.

Правила управления ГВУ:

- если есть рабочие зоны, в которых расход меньше декларируемого, то ГВУ увеличивает частоту вращения;
- если все АВД прикрыты, то ГВУ уменьшает частоту вращения до тех пор, пока хотя бы одна АВД не будет полностью открыта;
- если во всех рабочих зонах есть избыточный расход, то ГВУ уменьшает частоту оборотов.

Под недостаточным расходом понимается величина $\Delta Q_j^- = \max(0, Q_j^* - Q_j)$. Под избыточным расходом понимается величина $\Delta Q_j^+ = \max(0, Q_j - Q_j^*)$, где j – номер рабочей зоны.

Этот алгоритм является достаточно простым и может быть запрограммирован в микроконтроллеры, непосредственно управляющие вентиляционными устройствами (дверьми, вентиля-

торными установками). Для работы алгоритма не требуется наличие сетевых моделей воздухо-распределения и информации о топологии вентиляционной сети.

На основании сформулированных правил управления каждой АВД записывается формула для управляющих импульсов АВД:

$$F_i = I_{\text{АВД}} \left(\Delta Q_i^+ - \sum_j \Delta Q_j^+ + \sum_{k \neq i} \Delta Q_k^- + \Delta Q_i^- \lambda \right), \quad (4)$$

где $I_{\text{АВД}}$ – интенсивность регулирования АВД, определяемая в процессе пуска-наладки системы САУП; λ – логическая функция:

$$\lambda = \begin{cases} 1, & \text{все соседние АВД имеют избыточный расход} \\ 0, & \text{не все соседние АВД имеют избыточный расход.} \end{cases} \quad (5)$$

На основании сформулированных правил управления ГВУ записывается формула для управляющего импульса ГВУ:

$$G = I_{\text{ГВУ}} \left(\max_i (\Delta Q_i^+) - \min_i (\Delta Q_i^-) \right) + A_{\text{ГВУ}} \min_i (\phi_i), \quad (6)$$

где $I_{\text{ГВУ}}$ – интенсивность регулирования ГВУ, $A_{\text{ГВУ}}$ – интенсивность сопряжения ГВУ и АВД, ϕ_i – угол поворота жалюзиных створок АВД № i .

Дальнейшее развитие этого алгоритма описано в работах [12, 33, 35], где также представлены примеры практического внедрения САУП, основанных на описанном выше алгоритме оптимального управления. В работе [33] вместо функций (4)–(6) используются зависимости, получаемые из регрессионной модели на основе нейронных сетей. Алгоритм управления системы модифицируется для использования набора исторических данных, накапливаемых в процессе работы системы управления. Таким образом, впервые делается попытка перейти от автоматизированной к интеллектуализированной системе управления проветриванием. В работе [12] описан опыт по внедрению автоматизированных систем управления проветриванием на калийных рудниках компании ОАО «Беларуськалий (рудники 3-РУ и 4-РУ). Для условий рудника 4-РУ реализована стратегия посменного автоматизированного управления проветриванием в условиях нескольких главных вентиляторных установок. Описан уникальный пример внедрения САУП на руднике 4-РУ, вентиляционная сеть которого по классификации работы [11] является трудноуправляемой.

Заключение. Анализ литературы по методам и алгоритмам оптимального управления воздухо-распределением показал, что к настоящему времени разработано множество различных подходов и методов оптимизации воздухо-распределения, использующих линейное программирование, генетические алгоритмы, метод Ньютона и его различные модификации, методы решения обратных задач воздухо-распределения, методы теории автоматического управления и др. Наиболее полно исследована задача поиска оптимального воздухо-распределения для одной главной вентиляторной установки, в то время как для множества вентиляторных установок ряд вопросов остается нерешенным. В частности, отсутствует строгое доказательство оптимальности получаемых решений для множества вентиляторных установок.

К настоящему времени накоплен большой объем литературы по разработке систем управления проветриванием. Выделяются две глобальные концепции разработки таких систем – САУП в России и странах СНГ и Ventilation on demand (VOD) – за рубежом. В настоящей работе показаны ключевые отличия САУП и VOD. Также отмечено, что если в зарубежной литературе такие стратегии управления как позиционирование и реагирование на возможные события чаще всего разделяются между собой, то в России и странах СНГ они рассматриваются в качестве единой стратегии повышения безопасности при автоматизации систем вентиляции.

В существующей литературе представлено немного примеров практической реализации САУП и VOD, а описанные примеры имеют, как правило, очень ограниченный характер. В первую очередь это касается примеров внедрения VOD. При этом, если говорить о внедрении САУП, то наиболее прогрессивной на сегодняшний день системой является система автоматизированного управления вентиляцией на руднике 4-РУ ОАО «Беларуськалий», реализующая автома-

тическое посменное регулирование и позволяющая в режиме реального времени определять параметры нескольких главных вентиляторных установок и автоматических вентиляционных дверей.

Реализуемые и описанные в литературе варианты САУП и VOD приведены для ограниченного числа вариантов разработки месторождений. Предлагаемые решения не адаптированы для произвольных вариантов вскрытия, подготовки и систем разработки месторождений. В то же время широкое применение имеют многогоризонтные схемы вскрытия с фланговыми схемами проветривания, для которых задачи контроля и управления воздушораспределения не решены.

В литературе мало внимания уделяется аварийным режимам работы автоматизированных систем вентиляции. Проблема скорее в несовершенстве существующих методов обработки информации о состоянии шахтной атмосферы. При этом, с учетом современного развития приборной базы, проблема с получением достаточного объема данных измерений отсутствует. Возможно, в данной ситуации наиболее эффективными методами анализа и принятия решений в будущем окажутся методы интеллектуального управления проветриванием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ф.А. Расчет вентиляционных сетей шахт и рудников / Ф.А.Абрамов, Р.Б.Тян, В.Я.Потемкин. М.: Недра, 1978. 232 с.
2. Бабенко А.Г. Новое поколение шахтных информационно-управляющих систем и средств обеспечения безопасности на угольных шахтах / А.Г.Бабенко, С.Э.Лапин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2010. № 1. С. 73-84.
3. Бахвалов Л.А. Анализ современных систем автоматического управления проветриванием / Л.А.Бахвалов, И.В.Баранникова, А.Т.Агабубаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 7. С. 22-28.
4. Козырев С.А. Оптимизация размещения регуляторов распределения воздуха в вентиляционной системе рудника / С.А.Козырев, А.В.Осинцева // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 5. С. 135-143.
5. Кормициков Д.С. Исследование и разработка систем аэрогазодинамической безопасности подземных рудников: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь: Горный институт Уральского отделения РАН, 2015. 24 с.
6. Круглов Ю.В. Моделирование систем оптимального управления воздушораспределением в вентиляционных сетях подземных рудников: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь: Горный институт Уральского отделения РАН, 2006. 24 с.
7. Круглов Ю.В. Совершенствование алгоритма оптимального управления проветриванием вентиляционных сетей сложной топологии / Ю.В.Круглов, М.А.Семин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. Т. 12. № 9. С. 106-115.
8. Круглов Ю.В. Теоретические и технологические основы построения систем оптимального управления проветриванием подземных рудников: Автореф. дис. ... доктора техн. наук. Пермь: Горный институт Уральского отделения РАН, 2012. 42 с.
9. Левин Л.Ю. Исследование рециркуляционного способа проветривания калийных рудников и его экономическая эффективность / Л.Ю.Левин, Ю.В.Круглов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 10. С. 39-48.
10. Мальцев С.В. Исследование и разработка способов определения аэродинамических параметров сложных вентиляционных систем подземных рудников: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь: Горный институт Уральского отделения РАН, 2020. 24 с.
11. Местер И.И. Автоматизация контроля и регулирования рудничного проветривания / И.И.Местер, И.Н.Засухин. М.: Недра, 1974. 240 с.
12. Опыт внедрения систем динамического управления проветриванием рудников / Е.Л.Гришин, Е.В.Накаряков, Н.А.Трушкова, А.Н.Санникович // Горный журнал. 2018. № 6. С. 103-108. DOI: 10.17580/gzh.2018.08.15
13. Осинцева А.В. Обоснование эффективных вариантов регулирования вентиляции подземного рудника и оптимизация параметров регуляторов посредством генетического алгоритма / А.В.Осинцева, С.А.Козырев // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2011. Т. 14. № 3. С. 530-534.
14. Петров Н.Н. Система автоматизированного управления проветриванием шахт / Н.Н.Петров, С.А.Зырянов // Горный информационно-аналитический бюллетень 2009. № S13. С. 9-15.
15. Пучков Л.А. Методы и алгоритмы автоматического управления проветриванием угольных шахт / Л.А.Пучков, Л.А.Бахвалов. М.: Недра, 1992. 399 с.
16. Система наблюдения и оповещения персонала угольных шахт. Состояние и перспективы развития / М.О.Жуков, А.Е.Иванов, А.В.Мацко, И.В.Меркулов, Б.В.Нарымский // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18. С. 107-112.
17. Совершенствование ресурсосберегающих систем вентиляции рудников Верхнекамского месторождения калийных солей / Б.П.Казаков, Ю.В.Круглов, А.В.Шалимов, Л.Ю.Левин, А.Г.Исаевич, В.А.Стукалов // Горный журнал. 2008. № 10. С. 81-83.
18. Старков Л.И. Развитие механизированной разработки калийных руд: Монография / Л.И.Старков, А.Н.Земсков, П.И.Кондрашев. Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2007. 519 с.
19. Цой С.В. Автоматическое управление вентиляционными системами шахт. Алма-Ата: Наука, 1975. 335 с.
20. Achieving energy efficiency with medium voltage variable speed drives for ventilation-on-demand in South African mines / A.J.H.Nel, D.C.Arndt, J.C.Vosloo, M.J.Mathews // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 232. P. 379-390. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.05.376
21. Acuña E. Free and semi controlled splitting network optimisation using GAs to justify the use of regulators / E.Acuña, S.Hall, I.Lowndes // Proceedings of the IV International Conference on Mining Innovation, Gecamin, 23-25 June, 2010, Santiago, Chile, 2010. P. 79-87.

22. *Acuña E.I.* A Review of Primary Mine Ventilation System Optimization / E.I.Acuña, I.S.Lowndes // *Interfaces*. 2014. Vol. 44. Iss. 2. P. 163-175. DOI:10.1287/inte.2014.0736
23. *Acuña E.* Totten mine ventilation control system update: implementation and savings achieved with Level 1 «User control» and future plans / E.Acuña, C.Allen // *Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium*. 17-22 June 2017, Golden, Colorado, USA, 2017. P. 7-14.
24. *Barnes R.J.* A partial solution to optimal mine ventilation network design // *Proceedings of the 4th US Mine Ventilation Symposium*, 5-7 June, 1989, Berkeley, USA. P. 395-404.
25. *Brokering D.R.* Practical Implementation of VOD at the Henderson Mine / D.R.Brokering, D.M.Loring, C.J.Rutter // *Proceeding of the 16th North American Mine Ventilation Symposium*, 17-22 June, 2017, Golden, Colorado, USA. 2017. P. 15-22.
26. *Calizaya F.* Algorithm for selecting the optimum combination of main and booster fans in underground mines / F.Calizaya, M.J.McPherson, P.Mousset-Jones // *Proceedings of the 3rd Mine Ventilation Symposium*, Berkeley, USA.1987. P. 408-417.
27. *Chatterjee A.* Optimization of mine ventilation fan speeds according to ventilation on demand and time of use tariff / A.Chatterjee, L.Zhang, X.Xia // *Applied Energy*. 2015. Vol. 146. P. 65-73. DOI:10.1016/j.apenergy.2015.01.134
28. *Chatterjee A.* Optimisation of mine ventilation fan speeds on demand / A.Chatterjee, X.Xia, L.Zhang // *2014 International Conference on the Eleventh Industrial and Commercial Use of Energy*, 19-20 August, 2014, Cape Town, South Africa. 2014. P. 1-7. DOI:10.1109/icue.2014.6904187
29. *De Vilhena Costa L.* Cost-saving electrical energy consumption in underground ventilation by the use of ventilation on demand / L.De Vilhena Costa, J.Margarida da Silva // *Mining Technology*. 2020. Vol. 129. № 1. P. 1-8. DOI:10.1080/25726668.2019.1651581
30. *Hardcastle S.G.* Green and economic mine ventilation with an integrated air management system / S.G.Hardcastle, M.K.Gangal, E.Leung // *Proceedings of the 7th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*, 1998, Balkema, Rotterdam. P. 785-793.
31. *Huang C.* Mine ventilation network optimization using the generalized reduced gradient method / C.Huang, Y.J.Wang // *Proceedings of the 6th American Mine Ventilation Symposium*, 21-23 June, 1993, Salt Lake City, Utah, USA, 1993. P. 153-161.
32. *Jacques E.J.* Solution to the optimal setting of air flow-control devices in a ventilation network // *Proceedings of the 5th US Mine Ventilation Symposium*, 3 May, 1991, Morgantown, USA.
33. *Kashnikov A.V.* Applying machine learning techniques to mine ventilation control systems / A.V.Kashnikov, L.Levin // *Proceedings of 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements*, 24-26 May, 2017, St. Petersburg, Russia. 2017. P. 391-393. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970595
34. *Kumar G.V.* Minimizing power consumption in multiple fan networks by optimum fan selection / G.V.Kumar, V.R.Sastry, G.V.Krishna Rao // *Proceedings 7th American Mine Ventilation Symposium*, 5-7 June, 1995, Lexington, Kentucky, USA, 1995. P. 491-497.
35. *Levin L.Yu.* Conception of automated ventilation control system and its implementation in Belarussian potash mines / L.Yu.Levin, M.Semin // *Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium*, June 2017, Golden, Colorado, USA, 2017. P. 1-8.
36. *Li G.* Sensitivity analysis on parameter changes in underground mine ventilation systems / G.Li, C.Kocsis, S.Hardcastle // *Journal of Coal Science and Engineering (China)*. 2011. Vol. 17. № 3. P. 251-255. DOI:10.1007/s12404-011-0305-z
37. *Li B.-R.* Mine Ventilation Network Optimization Based on Airflow Asymptotic Calculation Method / B.-R.Li, M.Inoue, S.-B.Shen // *Journal of Mining Science*. 2018. Vol. 54. Iss.1. P. 99-110. DOI: 10.1134/S1062739118013413
38. *Lowndes I.S.* The application of genetic algorithms to optimize the performance of a mine ventilation network: The influence of coding method and population size / I.S.Lowndes, T.Fogarty, Z.Y.Yang // *Soft Computing*. 2005. Vol. 9. № 7. P. 493-506. DOI 10.1007/s00500-004-0364-9
39. *McPherson M.J.* Subsurface ventilation engineering. Fresno, California: Mine Ventilation Services Inc., 2009. 905 p. DOI:10.1007/978-94-011-1550-6
40. *Tran-Valade T.* Ventilation-On-Demand key consideration for the business case / T.Tran-Valade, C.Allen // *Proceedings of the Toronto 2013 CIM Conference*, Toronto, Canada.
41. *Ventilation-on-demand: Quality or quantity – A pilot trial at Barrick Gold's Bousquet mine* / S.G.Hardcastle, M.K.Gangal, M.Schreer, P.Gauthier // *Proceedings 8th American Mine Ventilation Symposium*, 11-17 June, 1999, Rolla, Missouri, USA, 1999. P. 31-38.
42. *Wallace K.* The practice of mine ventilation engineering / K.Wallace, B.Prosser, J.D.Stinnette // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015. Vol. 25. Iss. 2. P. 165-169. DOI:10.1016/j.ijmst.2015.02.001
43. *Wang Y.J.* A procedure for solving a more generalized system of mine ventilation network equations // *Proceedings of the 4th US Mine Ventilation Symposium*, 5-7 June, 1989, Berkeley, California, USA, 1989. P. 419-424.
44. *Womack J.P.* Lean Thinking. Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation / J.P.Womack, D.T.Jones. New York: Free Press, 2003. 397 p.
45. *Wu X.* Comparison of methods for determination of booster fan locations in underground mines / X.Wu, E.Topuz // *Proceedings of the 4th American Mine Ventilation Symposium*, 5-7 June, 1989, Berkeley, USA, 1989. P. 355-362.

Авторы: М.А.Семин, канд. техн. наук, научный сотрудник, seminma@outlook.com (Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия), Е.Л.Гришин, канд. техн. наук, заведующий сектором, aerogvg@mail.ru (Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия), Л.Ю.Левин, д-р техн. наук, заведующий отделом, aerolog_lev@mail.ru (Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия), А.В.Зайцев, канд. техн. наук, заведующий сектором, aerolog.artem@gmail.com (Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия).

Статья поступила в редакцию 18.11.2019.

Статья принята к публикации 22.09.2020.