

4. Накаряков Е.В. Натурные исследования рудничной атмосферы при работе техники с двигателями внутреннего сгорания // Горное эхо. – 2021. – № 4 (85). – С. 113-118. – DOI: 10.7242/echo.2021.4.22.
5. Накаряков Е.В. Исследование качественного состава рудничной атмосферы тупиковой горной выработки при отгрузке руды техникой с двигателем внутреннего сгорания // Горное эхо. – 2022. – № 2 (87). – С. 119-122. – DOI: 10.7242/echo.2022.2.19.

УДК 622.814

DOI:10.7242/echo.2024.2.14

## СЛОЖНОСТЬ ПРАКТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ВЕНТИЛЯЦИИ ШАХТ ПРИ ПОЖАРАХ

Д.Ю. Палеев

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В статье представлен обзор существующих методов расчета аварийных режимов при пожарах в шахтах в стационарной и нестационарной постановках. Описаны их достоинства и недостатки при моделировании сложных физических процессов при пожарах. Показана необходимость упрощения существующей физико-математической модели, в основе которой лежит замкнутая система уравнений газовой динамики в нестационарной постановке, и необходимость в разработке специальных методов ускорения вычислений, учитывающих особенности моделируемых процессов.

**Ключевые слова:** шахта, горные выработки, вентиляционная сеть, подземный пожар, газодинамический метод, математическая модель.

### Введение

Подземные пожары – сложный и опасный вид аварий, тушение которых всегда требует больших материальных затрат, часто носит затяжной характер, может сопровождаться безвозвратной потерей горных выработок, дорогостоящего оборудования и человеческими жертвами. В последние годы, при общем снижении количества пожаров, сложность и время их ликвидации возрастают из-за возможных взрывов метана и угольной пыли. Здесь первостепенную роль имеет выбор и организация правильного аварийного режима проветривания, обеспечивающего [1]:

- безопасный выход людей из аварийного участка или всей шахты на поверхность и уменьшение распространения продуктов горения в другие выработки шахты;
- выполнение первоочередных мер по тушению пожара.

Причем выбор аварийного режима надо делать в условиях, когда часть вентиляционных и изолирующих сооружений разрушены или повреждены, в выработках с высокой температурой возникли дополнительные источники тяги в виде тепловой депрессии, появились новые или интенсифицировались прежние источники газовыделения. В результате горноспасатели сталкиваются с необходимостью рассчитывать распределение вентиляционных потоков в сети горных выработок, плотность и температура которых изменяются во времени.

По мере усложнения условий добычи угля эволюционировали и методы решения задач вентиляции. Так, аналитические методы расчета вентиляции для простых вентиляционных сетей были достаточно хорошо разработаны уже в конце XIX века трудами европейских ученых. Тем не менее, такие вопросы как определение режимов работы вентиляторов и распределение воздуха по горным выработкам приходилось часто решать на глазок. А это нередко приводило к серьёзным ошибкам.

Одной из первых попыток перевести рудничную аэродинамику на научную базу путем использования достижений газовой динамики, явилась диссертация А.А. Скочин-

ского на звание профессора «Рудничный воздух и основной закон движения его по выработкам» [2]. Следующей серьезной работой можно считать монографию В.Н. Воронина [3], в которой не только дана глубокая трактовка физической сущности процессов рассеивания и удаления вредных газов вентиляционной струей и анализ условий эффективности этих процессов, но и рассмотрены новые научно обоснованные методы расчета проветривания важнейших видов подготовительных и очистных выработок.

Управление вентиляцией шахт в этот период основывалось, в основном, на интуиции и опыте инженерно-технического персонала и в меньшей степени – на элементарных, приближенных расчетах. Интуитивное управление сложными вентиляционными сетями неизбежно приводило к осложнениям в проветривании шахт. Применявшиеся в то время аналитический [4] и графо-аналитический [5] методы для расчёта всё усложняющихся сетей стали весьма трудоёмкими, а в некоторых случаях и вообще невозможными. Выходом из этого положения было создание в ИГД им. Скочинского аналоговой машины ЭВМС-6, на которой с применением электрических схем моделировались сложные вентиляционные сети с учетом работы нескольких вентиляторов, естественной тяги и наличия вентиляторов местного проветривания [6]. Эти машины активно использовались при проведении вентиляционных расчётов и просуществовали вплоть до 70-х годов прошлого столетия [7]. Были разработаны и методы решения нестационарных задач вентиляции с помощью этих аналоговых машин. Особенно активно велись работы по расчёту переходных аэродинамических процессов в вентиляционных сетях [8].

Появление ЭВМ и персональных компьютеров в угольной промышленности позволило перейти к более детальному моделированию процессов воздухораспределения в вентиляционных сетях шахт [9-16] и выработанных пространствах [17-20]. Это стимулировало разработку автоматизированных рабочих мест различного назначения [21-23] и привело к существенному расширению круга прикладных задач проветривания, решаемых математическими методами. Сформировалось и два принципиально различных подхода их решения – *стационарный*, применяемый в настоящее время для практических расчетов в горнорудной промышленности, и *нестационарный*, не вышедший пока из стен научно-исследовательских институтов. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки.

### **Стационарный подход**

Этот подход основан на законе сохранения объемных расходов в узлах сети, предполагает, что плотность и температура потока постоянны, а гидростатическое давление не учитывается [10, 12]. Однако такой подход не описывает целый ряд качественных и количественных изменений в вентиляционной сети, связанных с тепло- и массообменными процессами, учет которых очень важен в аварийных ситуациях, особенно при пожаре. При пожарах расход в аварийной выработке меняется из-за уменьшения плотности потока за счет его расширения при повышении температуры. То же самое происходит и в глубоких шахтах, где вентиляционный поток нагревается со стороны вмещающих пород. Расход в выработках меняется и при внезапном поступлении в поток дополнительных объемов метана.

Для повышения достоверности стационарного подхода стали учитывать изменение концентрации метана и температуры на воздухораспределение косвенным образом – введением дополнительных депрессий в запись 2-го закона Кирхгофа для независимых контуров вентиляционной сети [24]. Недостатком таких уточнений является невозможность учёта изменения параметров потока по длине горных выработок.

Недостатки стационарного подхода сказывается уже в процессе депрессионных съёмов, когда бывает трудно выполнить сбалансированный расчёт шахты в ситуа-

циях, связанных с правильным учётом контурных естественных тяг. При расчёте аварийных режимов, когда по выработкам перемещаются потоки с переменной плотностью, некорректность математической постановки часто приводит к неверным результатам. В первую очередь это относится к ситуациям, связанным с определением устойчивости вентиляционных струй, где результаты расчётов могут быть диаметрально противоположны реальной действительности [25]. Попытки учесть дополнительные эффекты тепло- и массообменных процессов не приводят к положительным результатам, поскольку в рамках используемой математической модели [10, 12] невозможно учесть взаимное влияние тепловой депрессии в контурах вентиляционной сети. Более того, часть факторов, влияющих на проветривание, сейчас описываются дифференциальными уравнениями, другая – эмпирическими формулами. Все они не связаны друг с другом и решаются самостоятельно, как отдельные задачи.

Наиболее сложными при использовании стационарного подхода являются задачи регулирования воздухораспределения и выбор аварийных вентиляционных режимов. Здесь необходимо решать целый комплекс различных задач, таких как оценку обстановки на аварийном участке, прогноз развития пожара, газовой ситуации и ее взрывоопасность. Поскольку в аварийной обстановке часть получаемой с места аварии информации, в силу объективных причин, может быть недостоверной или вообще отсутствовать, то выбор средств пожаротушения, оценка и выбор аварийного режима проветривания могут быть недостаточно эффективными. В этой ситуации наложение дополнительных ошибок, вызванных недостатками стационарного подхода расчета вентиляции, являются недопустимыми.

Выходом из создавшейся ситуации является запись законов Кирхгофа не через объёмные, а через массовые расходы, что автоматически приведёт к выполнению основных законов сохранения для узлов и контуров сети. Такая методика расчёта вентиляционных сетей на основе массовых расходов была разработана Б.И. Медведевым в [26]. Приведенная им система уравнений учитывает влияние процессов теплообмена на распределение воздушных потоков в условиях глубоких шахт и при подземных пожарах. Для этого необходимы данные о топологии сети, аэродинамических сопротивлениях ветвей, физических характеристик пород и воздуха. В целом каждая горная выработка должна быть описана двадцатью параметрами. Это позволило с учетом влияния теплообмена решать не только традиционные задачи проветривания с помощью ЭВМ, но и новые: исследовать проветривание при пожарах и моделировать различные аварийные режимы [24, 26, 27]. Однако сложность методики оказалась критичной для мощностей применявшихся в то время ЭВМ и она, к сожалению, не нашла своего применения.

В настоящее время существует более десятка вентиляционных программ, использующих метод контурных расходов. Некоторые из них имеют дополнительные модули, учитывающие: теплообмен с горным массивом, местные сопротивления, естественную тягу, тепловую депрессию, задымление, сжимаемость воздуха и влагообмен. Многие программы позволяют создавать графическую и оперативную часть Плана ликвидации аварий, осуществляют расчёт времени движения горнорабочих и отделений ВГСЧ, определяют оптимальные маршруты их движения [14, 16, 24-27]. Тем не менее, анализ особенностей применения компьютерных программ, реализующих стационарный подход, показывает, что в настоящее время отсутствует единая методика выбора вентиляционных режимов при пожарах, учитывающая весь комплекс тепло- и массообменных процессов при наличии интенсивного источника тепла, а также воздействие различных средств пожаротушения на аэродинамические характеристики аварийных выработок.

### Нестационарный подход

Технологии проходки горных выработок и ведения очистных работ неразрывно связаны с возникновением нестационарных возмущений, их распространением и затуханием в вентиляционной сети шахты. Изменение режима работы вентиляторов главного проветривания, открывание (закрывание) вентиляционных дверей и шлюзов, запуск и остановка вентиляторов местного проветривания приводят к возникновению переходных процессов в вентиляционной сети различной продолжительности, которые могут вывести количественное распределение параметров сети и концентрации переносимых примесей за допустимые пределы и создать аварийные ситуации.

Число нестационарных возмущений, как и число переходных процессов, резко возрастает при возникновении подземного пожара, что затрудняет выбор и поддержание аварийного режима проветривания. Для исключения подобных аварийных ситуаций, имеющих катастрофические последствия, необходимы методы их моделирования, по результатам которых можно прогнозировать как опасные изменения аэродинамической обстановки в выработках, так и разрабатывать способы и приёмы их предотвращения.

Известны попытки использования алгоритма решения стационарной задачи, который необходимо многократно повторять через некоторый заданный промежуток времени [28]. Однако этот алгоритм все равно использует метод контурных расходов, неразрывно связанный с теорией графов со всеми его недостатками. Предложенная в [29] динамическая модель на основе уравнения Лагранжа второго рода, в которой воздух несжимаемый, в действительности описывает переход вентиляционной сети из одного устойчивого состояния в другое методом установления, что не является расчетом переходного режима. Поэтому информация о динамике переходных процессов и их длительности принципиально не может быть получена с помощью динамической модели.

Очевидным выходом является решение задачи воздухораспределения с помощью математической модели, в основе которой лежит замкнутая система уравнений газовой динамики для многокомпонентной смеси в нестационарной постановке [30]. В ней учитывается влияние тепло- и массообменных процессов вентиляционного потока со стенками горных выработок, перенос примесей метана, тепловыделение в областях, охваченных пожаром, учет поля силы тяжести при неоднородном распределении плотности и температуры газа, работу вентиляторов и реальную топологию сети горных выработок. Модель основана на предположениях об одномерном движении газа, и мгновенном перемешивании потоков в узлах сопряжения выработок. Эффекты турбулентной вязкости и теплопроводности учитываются в уравнениях в правых частях с использованием интегральных коэффициентов аэродинамического сопротивления горных выработок и их сопряжений. С помощью такой математической модели можно быстро прогнозировать изменения аэродинамической обстановки и оперативно управлять ею, перераспределять аэродинамические потоки при ликвидации пожаров и давать реалистичные прогнозы при различных нестационарных возмущениях. В наиболее строгой постановке такая модель и разработанный на ее основе программный комплекс были апробированы в [30-31].

Однако практика применения нестационарной математической модели [30] выявила её существенный недостаток – очень большие затраты машинного времени на проведение расчетов. Все это считается нормальным при научных исследованиях, но неприемлемо при практических расчетах в ходе ведения горноспасательных работ. Поэтому необходимо упрощение существующей нестационарной постановки и разработка специальных методов ускорения вычислений, учитывающих особенности моделируемых процессов.

### Заключение

Пожар в горных выработках всегда приводит к интенсификации ряда физических процессов, которые начинают оказывать сильное влияние на воздухораспределение не только на аварийном участке, но и на всю вентиляционную сеть шахты. Применение стационарных методов расчета аварийных режимов приводит к неверным результатам, поскольку они не совсем точно описывают целый ряд взаимосвязанных качественных и количественных изменений в вентиляционной сети даже с использованием дополнительных модулей и различных уточняющих соотношений.

Наиболее точно описываемыми аварийные процессы являются нестационарные методы расчета на основе уравнений газовой динамики. Однако их численная реализация в строгой постановке требует неоправданно больших затрат машинного времени. Поэтому необходимо упрощение существующей нестационарной математической модели вентиляции [30] и ускорение вычислительного процесса, позволяющего использовать её в практических расчетах при ликвидации аварий в шахтах. Разработка и практическая реализация такого программного комплекса позволит эффективно рассчитывать сложные аварийные режимы проветривания горных выработок при возникновении в них пожаров с соблюдением всех законов сохранения и без каких-либо уточняющих соотношений, обязательных в стационарных постановках.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пашковский П.С., Лебедев В.И. Проветривание шахт при подземных пожарах. – Донецк: ЧП «Арпи», 2012. – 448 с.
2. Скочинский А.А. Рудничный воздух и основной закон движения его по выработкам: Дис. ... на звание проф. – СПб., 1905.
3. Воронин В.Н. Основы рудничной аэро-газодинамики. – М.; Л.: Углетехиздат, 1951. – 492 с.: ил.
4. Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Медведев И.И. Рудничная аэрология. – М.: Недра, 1978. – 440 с.: ил.
5. Пак В.С. Вентиляция шахт параллельно включенными вентиляторами. – М.: Углетехиздат, 1947. – 139 с.: черт.
6. Багиновский А.Д., Зубов Р.В. Расчет вентиляции при пожаре в шахте на электрической модели ЭМВС-6 // Рудничная аэрология и безопасность условий труда в шахтах: науч. сообщения. – М.: Недра, 1969. – С. 30-37.
7. Гранкин Л.Ф., Лебедев В.И., Цымбал Ю.М., Жариков В.М. Применение электрической аналоговой машины для расчёта вентиляционной сети шахты // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело: сб. – 1969. – Вып. 5. – С. 19-20.
8. Абрамов Ф.А., Бойко В.А. Автоматизация проветривания шахт. – Киев: Наукова думка, 1967. – 310 с.: ил.
9. Цой С., Цхай С.М. Электронно-вычислительная техника в вентиляционной службе шахт. – Алма-Ата.: Наука, 1966. – 233 с.: черт.
10. Тян Р.Б., Швец Г.А., Штанько И.М. Выбор метода расчёта вентиляционных сетей сложной топологии на электронных цифровых вычислительных машинах // Совершенствование проветривания шахт: [сб. ст.]. – М., 1967. – 263 с.: ил. – (Тр. ин-та АН УССР. Днепропетр. фил. Ин-та механики. Вып. 1).
11. Руководство по эксплуатации программной системы РЕВОД. Версия 4.2. / Акад. горн. наук Украины, Донбасский науч. центр. – Донецк: 1999. – 71 с.
12. Абрамов Ф.А., Тян Р.И., Потёмкин В.Я. Воздухораспределение в вентиляционных сетях шахт. – Киев: Наукова думка, 1971. – 135 с.: черт.
13. Круглов Ю.В. Расчет сложных вентиляционных сетей на ЭВМ // Изв. вузов. Горн. журн. – 2004. – №2. – С. 46-48.
14. Казаков Б.П., Круглов Ю.В., Исаевич А.Г., Левин Л.Ю. Разработка программно-вычислительного комплекса «АэроСеть» для расчета вентиляционных сетей шахт и рудников // Горн. информ.-аналит. бюл.: темат. прил. «Аэрология» – 2006. – С. 21-32.
15. Кормициков Д.С. Модернизация программы Аэросеть в связи с новыми требованиями к проведению инженерных расчетов для горноспасательных работ // Горное эхо. – 2019. – № 4 (77). – С. 111-117. – DOI: 10.7242/echo.2019.4.24.
16. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю. Программа расчета вентиляционных режимов в шахтах и рудниках // Горная промышленность. – 2007. – № 6 (76). – С. 20-23.
17. Абрамов Ф.А., Бойко В.А., Карбовский Ю.М., Швец Г.А. Математическое описание аэрогазодинамических процессов на выемочном участке угольной шахты // Разработка месторождений полезных ископаемых: сб. – Киев, 1967. – № 10. – С. 3-12.

18. Фельдман Л.П., Святный В.А., Касимов О.И. и др. Исследование утечек воздуха через выработанное пространство участка методами математического моделирования // Разработка месторождений полезных ископаемых: сб. – Киев, 1971. – № 22. – С. 105-110.
19. Палеев Д.Ю., Брабандер О.П. Математическое моделирование активного воздействия на взрывоопасные области и очаги горения в угольных шахтах. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1999. – 202 с.
20. Палеев Д.Ю. Сетевая задача проветривания горных выработок и выработанного пространства шахты // Вестн. Кузбасского гос. технич. ун-та. – 2006. – № 5 (56). – С. 58-62.
21. Худосовцев Н.М., Болбат И.Е., Тепер В.Б., Хорольский В.Т. Автоматизированная система составления на ЭВМ типа ЕС планов ликвидации аварий шахт (АСС ПЛА) // Предупреждение и тушение подземных пожаров: тез. докл. I Всесоюз. науч.-практ. конф. 4 секция: Управление вентиляцией шахт при подземных пожарах. – Донецк, 1978. – С. 65-66.
22. Потёмкин В.Я., Козлов Е.А., Кокоулин И.Е. Автоматизация составления оперативной части планов ликвидации аварий на шахтах и рудниках. – Киев: Техника, 1991. – 125 с.: ил.
23. Палеев Д.Ю. Автоматизированное рабочее место руководителя ликвидации аварии в угольных шахтах // Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф: докл. VI Междунар. конф., 29 окт. - 2 нояб. 2001 г. – Красноярск, 2001. – Т. 1. – С. 237-244.
24. Медведев Б.И., Почтаренко Н.С., Павловский В.А. Тепловые расчёты горных выработок в условиях рудничных пожаров на ЭЦВМ // Разработка месторождений полезных ископаемых: сб. ст. – Киев, 1973. – Вып. 34. – С. 103-108.
25. Левин Л.Ю., Палеев Д.Ю., Семин М.А. Расчет устойчивости воздушных потоков в выработках шахтных вентиляционных сетей по фактору тепловой депрессии // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2020. – № 1. – С. 81-85.
26. Медведев Б.И., Павловский В.А. Расчёт вентиляционных сетей шахт. – Киев: Техніка, 1977. – 120 с.: ил.
27. Медведев Б.И. Тепловые основы вентиляции шахт при нормальных и аварийных режимах проветривания. – Киев, Донецк: Вища школа. – 1978. – 154 с.: ил.
28. Круглов Ю.В., Исаевич А.Г., Левин Л.В. Сравнительный анализ современных алгоритмов расчета вентиляционных сетей // Изв. вузов. Горн. журн. – 2006. – № 5. – С. 32-37.
29. Танцов П.Н. Разработка метода динамического расчёта шахтной вентиляции для моделирования аэрологических чрезвычайных ситуаций: дис. ... канд. техн. наук. 05.26.02 / Танцов Петр Николаевич. – М., 2013. – 132 с.: ил.
30. Ващилов В.В. Разработка газодинамической модели и метода расчета нестационарных режимов проветривания угольных шахт: дис. ... канд. техн. наук. 25.00.20 / Ващилов Валерий Валерьевич. – Кемерово, 2010. – 126 с.: ил.
31. Ващилов В.В., Палеев Д.Ю. Изменение характеристик вентиляционного потока при пожаре // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2009. – № 2. – С. 128-132.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2024.2.15

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА УСТОЙЧИВОСТИ ПРОВЕТРИВАНИЯ РУДНИКОВ В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ, СВЯЗАННЫХ С НАЛИЧИЕМ ТЕПЛОВЫХ ДЕПРЕССИЙ

М.Д. Попов

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Данная статья посвящена исследованию динамики конвективных потоков воздуха в пределах наклонных горных выработок, позволяющий определить критическую тепловую мощность источника тепловыделения и условия опрокидывания воздушного потока при наличии тепловой депрессии. В статье рассмотрен один из способов проведения натурного эксперимента с использованием имитационного стенда. Выполнено трехмерное численное моделирование с целью определения основных требований, которым должна отвечать проектируемая установка. Так же на основании трехмерного численного моделирования получены качественные зависимости устойчивости проветривания от изменяемых параметров наклонной выработки при наличии интенсивного источника нагрева.

**Ключевые слова:** рудничная вентиляция, устойчивость проветривания, подземный пожар, аварийная ситуация, моделирование.