

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук,  
профессора Калединой Нины Олеговны  
на диссертационную работу Попова Максима Дмитриевича

на тему: «Расчет воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях с учетом тепловой депрессии в наклонных горных выработках», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Диссертационная работа изложена на 157 стр., включает введение, 5 глав, заключение и список литературы из 215 наименований (из них 91 – по материалам зарубежных исследований).

**В первой главе** приведен анализ состояния исследований в области подземных экзогенных пожаров, выполненный обстоятельно, на базе обзора обширного круга актуальных отечественных и зарубежных литературных источников - из них более 20 % опубликованы в последние 10 лет, - на основе которого сформулированы цель и задачи работы.

**Вторая глава** посвящена описанию разработки методики исследования и испытательного аэродинамического стенда для экспериментальных исследований процессов тепломассопереноса в наклонной выработке, результаты которых использовались в дальнейшем для параметризации и валидации трехмерной численной модели. Экспериментально устанавливалось влияние мощности источника тепловыделения, режима проветривания, аэродинамической характеристики и угла наклона выработки на распределение термодинамических параметров в потоке движущегося воздуха. Приведено обоснование критериев подобия физического моделирования изучаемых процессов, необходимого числа измерений, методика измерений и результаты физического моделирования.

**В третьей главе** приводится описание разработки трехмерной численной модели нестационарного тепломассопереноса в наклонной выработке при наличии интенсивного источника тепловыделения (математическая постановка задачи на основе использования численного метода RANS с моделью турбулентности Realizable k-epsilon, геометрическая модель, граничные и начальные условия, выбор расчетной сетки на основе исследований сеточной сходимости). Приведены результаты валидации численной модели на основе результатов лабораторных исследований. Также проведен сравнительный анализ различных моделей турбулентности и сделан вывод о пригодности моделей турбулентности RANS для анализа закономерностей стационарных неизотермических течений в наклонных выработках со стратификацией потока вследствие наличия интенсивного источника тепловыделения.



**В четвертой главе** описаны результаты исследования закономерностей влияния основных определяющих факторов на динамику термоаэродинамических параметров наклонной горной выработки с нисходящим проветриванием при пожаре на основе численного многопараметрического моделирования для условий модели испытательного стенда.

По полученным результатам установлена линейная регрессионная зависимость для массового расхода воздуха в выработке от основных исследуемых параметров задачи, позволившая определить критическую тепловую мощность источника нагрева как функцию от аэродинамических параметров горной выработки при нисходящем проветривании. Также получена зависимость изменения плотности воздуха от тепловой мощности пожара в наиболее неблагоприятной критической ситуации опрокидывания вентиляционной струи. Установлено, что вероятность опрокидывания воздушной струи в большей степени зависит от мощности пожара и начального перепада давления на входе потока, чем от аэродинамического сопротивления выработок за наклонной выработкой с источником тепловыделения (по ходу движения струи в штатном режиме). Выполнена оценка величины коэффициента продольной дисперсии для различных режимов работы источника тяги, что позволило установить связь этого параметра с устойчивостью движения потока при наличии источника нагрева и предложить его в качестве критерия оценки устойчивости проветривания выработки при наличии тепловой депрессии. Для перехода к моделированию реальных горных выработок выполнена оценка принятых критериев подобия, подтвердившая правомерность их масштабирования.

**В пятой главе** приведено описание разработанных методов и алгоритмов расчёта воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях, учитывающих тепловые депрессии при пожарах: определение критической тепловой мощности источника при подземном пожаре, определение тепловой мощности точечных и распределенных источников тепловыделения в условиях рудничных аварий, расчет воздухораспределения в шахтной вентиляционной сети с учетом действия тепловой депрессии. Совокупность разработанных методов легла в основу методики одномерного сетевого расчета воздухораспределения в вентиляционных сетях произвольной топологии с учетом тепловой депрессии интенсивного источника тепловыделения, реализованную в ПК «Аэросеть».

К каждой главе четко сформулированы выводы с указанием статей, где опубликованы полученные результаты.

Ниже приведена оценка соответствия работы критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.



## 1. Актуальность темы диссертации

Диссертация посвящена изучению процессов тепломассопереноса в наклонных горных выработках при пожаре, в частности, влияния характеристик сети и интенсивности источника тепловыделения на характер протекания этих процессов.

Исследования автора диссертации направлены на борьбу с подземными пожарами в шахтах и рудниках, которые являются весьма сложным видом аварий, сопровождающихся максимальным материальным ущербом и представляющих значительную опасность для персонала предприятий и горноспасателей. Наибольшую опасность на этапе локализации и ликвидации аварии, связанной с возгоранием, а также во время эвакуации горнорабочих на подземных рудниках представляют продукты горения, которые делают шахтную атмосферу непригодной для дыхания и существенно ограничивают видимость.

Для безопасного вывода людей с угрожаемого участка и в ходе дальнейшего процесса ликвидации аварии и ее последствий необходимо определять зону распространения продуктов горения. Наибольшую сложность для решения данной задачи представляет наличие в шахтных (рудничных) вентиляционных сетях наклонных горных выработок с нисходящим проветриванием, в которых возможно изменение направления движения воздушного потока на восходящий в том случае, если величина тепловой депрессии пожара превышает критическую депрессию горной выработки. Определение зоны распространения продуктов горения с учетом опрокидывания вентиляционной струи должно осуществляться достаточно оперативно в связи с тем, что при высокопроизводительной разработке месторождений вентиляционные сети подземных горных предприятий постоянно изменяются, а сложность их топологии и протяженность возрастают с увеличением глубины ведения работ.

При этом в настоящее время отсутствуют методики расчета устойчивости проветривания наклонных горных выработок, учитывающие в комплексное влияние разнородных параметров на характер процессов тепломассообмена при конвективном движении воздуха, что предопределяет необходимость исследований в данном направлении. Тем не менее, действующие нормативные документы уже сегодня требуют обязательного расчёта параметров развития пожара, режимов вентиляции и устойчивости вентиляции при пожаре в вертикальных или наклонных выработках с использованием специализированного программного обеспечения для обоснованной разработки мер предотвращения «опрокидывания» вентиляционной струи из-за тепловой депрессии и корректировки планов по ликвидации и локализации пожаров.

Таким образом, исследования в данной области являются актуальными и имеют большую научную и практическую ценность для горнодобывающих предприятий.



## **2. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их новизна**

Научные положения, выводы и рекомендации, выносимые Поповым Максимом Дмитриевичем на защиту, основаны на результатах проделанного им достаточного объема теоретических, экспериментальных и расчетных исследований с использованием комплекса современных методов исследований в области численного моделирования.

Для решения поставленных задач и определения критериев устойчивости проветривания наклонных горных выработок с нисходящим проветриванием в аварийной ситуации автор предложил трёхмерную математическую модель нестационарного теплопереноса в наклонной горной выработке с интенсивным источником тепловыделения. Для получения достоверных результатов моделирования эта модель была параметризована и калибрована по данным экспериментальных исследований, полученных на разработанном автором испытательном аэродинамическом стенде, имитирующем наклонную горную выработку с пожаром. Для соблюдения условий корректности математической модели при сопоставлении ее с шахтными условиями были использованы необходимые критерии подобия, позволяющие масштабировать результаты, полученные при моделировании.

Таким образом достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается соответствием фундаментальным физическим законам, сопоставимостью результатов аналитических, численных решений и натурных измерений, большим объемом экспериментальных исследований в лабораторных условиях, а также положительными результатами верификации и валидации разработанных моделей.

## **3. Научные результаты и их ценность**

В качестве научных результатов можно выделить следующее:

1. На основании трехмерного численного моделирования процессов теплопереноса в наклонной горной выработке при пожаре получены регрессионные зависимости для определения критической тепловой мощности, при которой произойдет изменение направления движения воздушного потока в зависимости от аэродинамических параметров участка вентиляционной сети; также получена зависимость изменения плотности воздуха в момент неустойчивого проветривания; указанные зависимости легли в основу методики и алгоритмов расчета распределения воздуха в шахтной вентиляционной сети, учитывающих влияние тепловой депрессии пожара в наклонной выработке на устойчивость проветривания при авариях, связанных с возгоранием.



2. Установлена возможность применения среднего коэффициента продольной дисперсии как одного из критериев определения устойчивости движения воздушного потока, использование которого позволит более точно определить зоны возможного задымления и распространения пожара.

3. Доказана возможность эффективного сочетания математического и физического моделирования для корректного описания процессов конвективного теплопереноса при использовании подхода RANS за счет использования закономерностей, установленных на физической модели, для параметризации и валидации компьютерной модели.

4. Разработана, откалибрована и верифицирована трехмерная численная модель процессов тепломассопереноса в наклонной горной выработке с нисходящим проветриванием при наличии в ней источника горения.

5. Разработаны методика и алгоритмы расчета и анализа стационарного распределения воздуха и задымления в шахтных вентиляционных сетях произвольной топологии с учетом тепловой депрессии при пожаре в наклонной горной выработке, представляющие собой инструментальный анализ аварийных режимов проветривания рудника при пожаре.

#### **4. Теоретическая и практическая значимость работы**

Полученные в работе теоретические результаты имеют важное значение для развития шахтной аэрогазо- и термодинамики в части разработки новых методов исследования и расчета сложных процессов тепломассопереноса, позволяющих решать задачи обеспечения устойчивости проветривания наклонных горных выработок с нисходящим движением воздуха при наличии интенсивного источника возгорания на основе полученных зависимостей, моделей и алгоритмов.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что реализация разработанного алгоритма расчета воздухораспределения вентиляционных сетей произвольной топологии с учетом тепловой депрессии пожара существенно повышает качество разработки мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий, связанных с устойчивостью проветривания при подземных пожарах, повышает эффективность и безопасность ведения аварийно-спасательных работ. Разработанный автором алгоритм реализован в программном комплексе «Аэросеть» и успешно применяется для выполнения расчетов устойчивости на горнодобывающих предприятиях Российской Федерации.

В будущем эти расчеты могут быть интегрированы в МФСБ (многофункциональные системы безопасности) рудника и использовать оперативные данные контроля состояния атмосферы горных выработок. Это позволит точнее учесть тепловое влияние пожара на



параметры воздушных потоков, не повысив существенным образом вычислительной сложности используемых расчетных методов.

## **5. Опубликование результатов исследований автора диссертации**

Основные результаты, полученные в результате проведенных исследований, в достаточной степени представлены в 16 публикациях, в том числе 8 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации, из них 8 - в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science. Материалы неоднократно докладывались на конференциях различного уровня.

## **6. Оформление диссертации**

Техническое оформление диссертации соответствует действующим требованиям ГОСТ 7.0.11.-2011 «Диссертация и автореферат диссертации». Диссертация написана технически грамотным языком, все ее части логически взаимосвязаны друг с другом и образуют единое целое. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

## **7. Замечания и вопросы по работе**

По рассмотренной диссертационной работе есть следующие вопросы и замечания:

1. В работе автора все рассуждения приведены для случая постоянного газового состава рассматриваемой смеси, однако в зависимости от объекта возгорания газовый состав может значительно изменяться, - желательно указать рекомендации относительно этого обстоятельства.

2. При оценке сходимости принятой сетки в работе нет обоснования принятого размера ячейки на поверхности источника нагрева.

3. Физическая модель позволяет исследовать влияние на формирование тепловой депрессии такого значимого фактора как угол наклона выработки, и в работе есть раздел, посвященный измерениям параметров воздушного потока «...для различных углов наклона испытательного стенда», но в тексте приведены результаты только для двух положений: горизонтального для угла наклона  $-13^\circ$ , и вывод о влиянии угла наклона выработки на опрокидывание струи воздуха под действием тепловой депрессии не сформулирован. С чем это связано: влияние данного фактора оказалось несущественным, или оно учитывается другими параметрами?

4. При оценке возможности масштабирования полученных регрессионных зависимостей для случая реальных горных выработок нет четкого определения границ их применимости. Неясно, какова степень универсальности этих регрессионных зависимостей,



каково их предназначение в дальнейшем – можно ли использовать их для разных рудников или шахт, или необходимо определять заново для каждого нового объекта.

5. В предложенном алгоритме расчета воздухораспределения рассмотрено размещение источника возгорания в середине наклонной выработки, а каким образом учитывается влияние произвольного местоположения источника (очага пожара) в реальных сетях на величину тепловой депрессии (это может иметь важное значение при определении опасных зон ведения аварийно-спасательных работ)?

6. Следует отметить также замечания к технической стороне оформления работы: одни и те же величины в разных разделах могут обозначаться разными символами; в ряде приведенных формул не ко всем параметрам есть расшифровка; в подписи к рис.5.8 неправильно указано название рудника; в подрисуночных подписях не всегда указаны все условные обозначения, - что затрудняет восприятие работы при чтении. Кроме того, в соответствии с принятым стандартом выводы по главам не нумеруются.

Указанные замечания не снижают качество представленной к защите диссертационной работы и являются предметом дискуссии.

## **8. Заключение о соответствии диссертационной работы критериям, установленным ВАК РФ**

Рецензируемая диссертационная работа является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей решение научно-технической задачи по разработке методики расчета устойчивости проветривания наклонных горных выработок с нисходящим проветриванием при пожаре, имеющей важное значение для горнодобывающих отраслей Российской Федерации в части обоснования и корректировки планов мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий, связанных с возгоранием, на горных предприятиях.

Диссертация отвечает критерию внутреннего единства, имеет четкую структуру, характеризуется тщательной проработкой результатов исследований, а также логической связью отдельных разделов, научных положений, выводов и рекомендаций.

Приведенные замечания не изменяют общей положительной оценки работы, так как они не затрагивают научно-методической базы решения поставленных задач, сущности полученных научных результатов и уровня их практической значимости.

Таким образом, диссертация **«Расчет воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях с учетом тепловой депрессии в наклонных горных выработках»**, представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная



теплофизика», полностью соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 (ред. от 25.01.2024), а ее автор **ПОПОВ Максим Дмитриевич** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Я, Каледина Н.О., автор отзыва, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Профессор кафедры Безопасности  
и экологии горного производства  
доктор технических наук, профессор

Каледина Нина Олеговна

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС».

Почтовый адрес: 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1.

Официальный сайт: <https://misis.ru/>

e-mail: [kancela@misis.ru](mailto:kancela@misis.ru)

Телефон: +7 (495) 955-00-32

Подпись доктора технических наук, профессора Калединой Н.О. удостоверяю.

«13 » января 2025 г.

М.П.

ПОДПИСЬ \_\_\_\_\_ ЗАВЕРЯЮ  
Проректор по безопасности  
и общим вопросам  
НИТУ МИСИС \_\_\_\_\_ Исаев

