На правах рукописи

Костеренко Виктор Николаевич

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЕНТИЛЯЦИИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК УГОЛЬНЫХ ШАХТ

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Томск - 2011

Работа выполнена в государственном общеобразовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный университет»

Научный руководитель:	доктор технических наук, Палеев Дмитрий Юрьевич
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, профессор, Глазунов Анатолий Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, Ворожцов Александр Борисович
Ведущая организация:	Учреждение российской академии наук Институт прикладной механики УрО РАН. Адрес: 426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, д. 34.

Защита диссертации состоится «15» апреля 2011 г. в 14-30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.267.13. при ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке при ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан «___» марта 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Угольные шахты относятся к предприятиям с повышенной опасностью труда. Это обусловлено в первую очередь выделением метана, адсорбированного в угле, при его добыче. Удаление взрывоопасного газа из зоны забоя и прилегающих выработок проводится путем организации достаточной вентиляции выработок. Вентиляция необходима для обеспечения нормальных санитарно-гигиенических условий труда горняков.

Техническое перевооружение угольных шахт новой высокопроизводительной техникой повысило производительность труда (например, в Кузбассе отдельные очистные участки добывают 10000 – 20000 тонн в сутки). Это приводит к увеличению газовой нагрузки на забой. При отработке газоносных пластов вопросы обеспечения условий для высокопроизводительной и безопасной работы горной техники по газовому фактору становятся все более актуальными, поскольку технические возможности средств очистной выемки угля на пологих пластах в 3-4 раза превышают допустимую нагрузку на лаву по газовому фактору. Поэтому при отработке высокогазоносных выемочных полей невозможно обеспечить высокопроизводительную работу выемочных машин без комплексного применения способов управления метановыделением на выемочных участках средствами вентиляции и дегазации источников газовыделения.

Из-за низкой эффективности совместного применения средств вентиляции и комплексной дегазации на современных высокопроизводительных угольных шахтах не всегда удаётся своевременно ликвидировать опасность местных скоплений метана на сопряжении лавы с вентиляционной выработкой, а также в отдельных участках вентиляционной системы шахты. Как следствие этого, на шахтах им. Шевякова (Кузбасс, 1992 г.), «Воркутинская» (Печорский бассейн, 1995 г.), «Баренцбург» (о. Шпицберген, 1996 г.), «Зыряновская» (Кузбасс, 1997 г.), «Центральная» (Печорский бассейн, 1998 г.), «Ульяновская» (Кузбасс,2007 г.), «Распадская» (Кузбасс 2010 г.) произошли катастрофические взрывы метанопылевоздушной смеси, в результате которых погибло более 300 горняков.

Анализ причин возникновения этих аварий указывает на недостаточную эффективность оперативного управления вентиляцией шахт и наличие нерешённых вопросов борьбы с газом.

Существенную роль в накоплении метана в выработках угольных шахт играют нестационарные процессы их вентиляции. Нестационарные процессы вентиляции угольных шахт возникают при изменении режима проветривания сети выработок, при установке вентиляционных шлюзов и других и изоляционных сооружений, изменяющих потокораспределение воздуха в сети выработок. Во время нестационарных процессов вентиляции возможно возникновение слабо проветриваемых зон, в которых могут образовываться зоны слоевого и местного загазования метаном с высокой его концентрацией. Нестационарные аэродинамические процессы в сети выработок возникают в аварийной ситуации при внезапных выбросах метана, при возникновении локальных очагов пожара и их развитии. В этих условиях требуются оперативность и точность прогнозирования параметров загазования метаном выработок угольной шахты.

Расчет проветривания шахт и рудников в настоящее время на всех шахтах России проводится на основе стационарного подхода в предположении несжимаемости среды. На базе такого подхода расчет нестационарных процессов вентиляции принципиально невозможен. Поэтому разработка газодинамических методик расчета нестационарных процессов вентиляции, в том числе методик, учитывающих возможное возникновение и развитие пожара, является актуальной.

Цель работы: разработать газодинамический подход, позволяющий анализировать нестационарные аэродинамические процессы вентиляции угольной шахты.

Задачи исследований:

1. Разработка газодинамической модели нестационарных процессов вентиляции сети горных выработок угольной шахты, учитывающей тепло- и массообмен потоков рудничной атмосферы со стенками выработок, конвективный перенос примесей метана в рудничной атмосфере, тепловыделение в областях, охваченных пожаром, естественно-конвективное движение рудничной атмосферы в поле силы тяжести при неоднородном распределении плотности и температуры газа, реальную топологию сети горных выработок.
2. Проведение параметрических расчетов нестационарных процессов вентиляции сети выработок шахты при реверсе главного вентилятора проветривания, при работе газоотсасывающих установок, вентиляторов местного проветривания, с учетом выделения метана со стенок выработок в вентиляционный поток и анализ их результатов.
3. Расчет течения газа и газообразных продуктов сгорания в сети выработок в случае возникновения и постепенного развития пожара в горизонтальных и наклонных выработках шахты. Развитие пожара рассчитывать на основе модели, в которой распространение фронта горения определяется прогревом горючих материалов газообразными продуктами сгорания до температуры воспламенения.
4. Проведение параметрических расчетов, анализ результатов и выработка рекомендаций по управлению нестационарными процессами вентиляции, в том числе при возникновении и распространении пожара путем расстановки вентиляционных сооружений, изолирующих перемычек в выработках, примыкающих к выработке, в которой происходит горение.

Методы исследований: Для решения задач и целей исследований использовался анализ и обобщение данных научно-технической литературы, построение математических моделей нестационарной аэродинамики в горных выработках с использованием методов механики сплошных сред и математической физики, их численное решение с применением ЭВМ, проведение тестовых расчётов, сравнение полученных результатов математического моделирования с существующими методиками аналогичных расчётов.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Газодинамическая модель нестационарных процессов вентиляции сети горных выработок угольной шахты, учитывающая тепло- и массообмен потоков рудничной атмосферы со стенками выработок, конвективный перенос примесей

метана в рудничной атмосфере, тепловыделение в областях, охваченных пожаром, естественно-конвективное движение рудничной атмосферы в поле силы тяжести при неоднородном распределении плотности и температуры газа, реальную топологию сети горных выработок, работу вентиляционного оборудования.

2. Методика расчёта нестационарных процессов вентиляции сети горных выработок угольной шахты с учетом работы вентиляционного оборудования, постепенного развития локального очага пожара.

3. Локальный очаг возгорания в наклонной выработке угольной шахты приводит к опрокидыванию воздушного потока в течение малого промежутка времени; направление развития пожара от локального возгорания определяется направлением потока горячих газообразных продуктов сгорания.

4. Расстановкой вентиляционных сооружений и изолирующих перемычек в местах, примыкающих к выработке, в которой происходит горение, возможно управлять скоростью распространения пожара и направлением распространения газообразных продуктов сгорания в сети выработок угольной шахты при возникновении и развитии пожара.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается:

- обоснованностью исходных положений и использованием классических методов математического моделирования нестационарных газодинамических процессов;
- сходимостью результатов решения задачи нестационарного проветривания сети выработок угольной шахты до установления потокораспределения с результатами решения задачи в стационарной постановке методом Андрияшева;
- сходимостью вычислительных методик расчета процессов вентиляции при уменьшении шагов разностной схемы, выполнимостью законов сохранения массы и энергии в численном решении.

Научная новизна работы:

1. Предложена газодинамическая модель нестационарных процессов вентиляции сети горных выработок угольной шахты, учитывающая тепло- и массообмен потоков рудничной атмосферы со стенками выработок, конвективный перенос примесей метана в рудничной атмосфере, тепловыделение в областях, охваченных пожаром, естественно-конвективное движение рудничной атмосферы в поле силы тяжести при неоднородном распределении плотности и температуры газа.

2. Разработаны математические модели учета функционирования вентилятора главного проветривания, вентиляторов местного проветривания, газоотсасывающих установок для моделирования аэродинамических нестационарных процессов в сети выработок угольных шахт.

3. Разработана математическая модель расчёта нестационарных процессов вентиляции сети горных выработок угольной шахты с учетом постепенного развития локального очага пожара.

4. Выяснено, что локальный очаг возгорания в наклонной выработке угольной шахты приводит к опрокидыванию воздушного потока в течение малого

промежутка времени; направление развития пожара от локального возгорания определяется направлением потока горячих газообразных продуктов сгорания.

5. Показано, что установкой вентиляционных шлюзов и изолирующих перемычек в местах, примыкающих к выработке, в которой происходит горение, можно управлять скоростью распространения пожара и направлением распространения газообразных продуктов сгорания в сети выработок угольной шахты.

Практическая ценность работы заключается:

- Разработана газодинамическая модель нестационарных процессов вентиляции сети горных выработок угольной шахты.

- Разработана методика расчёта нестационарных процессов вентиляции сети горных выработок угольной шахты с учетом работы вентиляционного оборудования, постепенного развития локального очага пожара.

Результаты выполненных исследований позволяют:

- повысить точность определения зон загазования при возникновении нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты;

- определять места безопасного размещения людей и оборудования, задействованных в ходе ликвидации возгорания или пожара;

- прогнозировать распространение пожара в сети выработок угольной шахты

- прогнозировать распространение газообразных продуктов сгорания в сети выработок угольной шахты во время пожара.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы для расчета нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты. Они могут быть использованы при составлении Планов ликвидации аварий для расчета зон загазования газообразными продуктами горения выработок шахты при возникновении пожара, для определения безопасных маршрутов движения горнорабочих и горноспасателей при изменении режима вентиляции на аварийном участке. Они могут применяться для организации научно обоснованного управления аэрогазодинамическими процессами при комбинированном способе проветривания и высоких скоростях подвигания очистного забоя.

Апробация работы. Результаты работы были доложены на IV Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах» (г. Кемерово, 2000), Всероссийской научно-практической конференции «Промышленная безопасность» (г. Москва, 2001), XII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (г. Владимир, 2003), Международной научно-практической конференции «Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» (г. Новокузнецк, 2006), X международной научно-практической конференции, проведённой в рамках ежегодных научных чтений МАНЭБ «Белые ночи» «Безопасность жизнедеятельности предприятий топливно-энергетического комплекса России» (гг. Кемерово-Санкт-Петербург, 2006), 6-й международной научной конференции «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент» (г. Астана, 2008), X Международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности» (г. Кемерово, 2008), Всероссийской научной конференции, посвященной 100–летию со дня рождения проф.

М.С. Горохова (г. Томск, 2009), Всероссийской научной конференции «Байкальские чтения: Наноструктурные системы и актуальные проблемы механики сплошной среды (теория и эксперимент)» (г. Улан-Удэ, 2010), на научном симпозиуме «Неделя горняка-2011» (г. Москва, 2011). А также основные положения диссертации и отдельные ее части докладывались и обсуждались на семинарах кафедры прикладной аэромеханики ТГУ, на технических советах Госгортехнадзора РФ, Центрального штаба ВГСЧ угольной промышленности РФ и компании СУЭК.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 23 печатных работах, в том числе в научных журналах, рекомендованных ВАК 4, двух монографиях и одном нормативном документе.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения, изложенных на 123 страницах машинописного текста, включая 45 рисунков, 1 таблицу, список литературы из 129 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи работы. Даётся описание научных положений, выносимых на защиту, подчёркивается их обоснованность, достоверность, новизна и практическая ценность.

В первой главе дан обзор методов моделирования и расчета проветривания сети выработок угольных шахт. Проанализированы существующие физико-математические модели и подходы к учету нестационарных процессов вентиляции шахт. Приведено описание технологических и аварийных ситуаций в угольной шахте, приводящих к возникновению нестационарных режимов вентиляции. К их возникновению приводят изменение режимов работы вентилятора главного проветривания, вентиляторов местного проветривания, газоотсасывающих установок, установка вентиляционных сооружений в выработках угольной шахты, а также реверсирование вентиляционной струи. Особо выделяются аварийные режимы проветривания угольной шахты, возникающие при внезапных выбросах метана, при возникновении пожара в выработке. Сделан вывод, что в рамках существующих подходов невозможно моделировать такие нестационарные аэродинамические процессы в сети выработок, как изменение вентиляции при реверсе вентилятора главного проветривания, а также в условиях возникновения локального очага пожара и его развития.

В п. 1.4 сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе сформулированы требования к математической модели нестационарной аэродинамики горных выработок. Она должна использоваться для быстрого прогнозирования аэродинамической обстановки в сети выработок и для оперативного управления аэродинамикой проветривания с использованием вентиляционного оборудования и сооружений. Модель должна давать адекватную информацию о распространении вредных и взрывоопасных примесей рудничной атмосферы. Эта информация должна быть получена из численного ре-

шения математической модели быстро, для своевременного и оперативного принятия управленческих решений.

Поэтому математическая модель основывается на предположениях об одномерном движении газа в прямолинейных выработках, полном и мгновенном перемешивании потоков в узлах сопряжения прямолинейных выработок. Эффекты турбулентной вязкости и теплопроводности учитываются в уравнениях в правых частях с использованием интегральных коэффициентов аэродинамического сопротивления горных выработок и мест их пересечения, которые подробно изучены экспериментально. В математической модели также необходимо учитывать эффекты естественной конвекции неизотермического газа при его движении в наклонных выработках. Поток газа, поступающий в сеть выработок, вступает в теплообмен со стенками выработок. Для прогнозирования влияния естественной конвекции на аэродинамику рудничной атмосферы в сети выработок необходимо учитывать в математической модели теплообмен рудничной атмосферы со стенками выработок, а также изменение температуры стенок при теплообмене. Неоднородное распределение легких примесей в рудничной атмосфере также приводит к естественно-конвективному движению в наклонных выработках, которое также необходимо учитывать в математической модели. Процессы вентиляции определяются пространственной топологией выработок и расстановкой и режимами работы вентиляционного оборудования (вентилятора главного проветривания, вентиляторов местного проветривания, газоотсасывающих установок, вентиляционных сооружений, располагающихся в выработках шахты). С учетом всех перечисленных физических процессов и эффектов система уравнений нестационарной аэродинамики сети выработок угольных шахт запишется в виде:

$$\frac{\partial \rho s}{\partial t} + \frac{\partial \rho s u}{\partial x} = \Pi \dot{m}, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho s u}{\partial t} + \frac{\partial \rho s u^2}{\partial x} + s\frac{\partial p}{\partial x} = \Pi \tau_w - s\rho g \sin\gamma, \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho s\left(e + \frac{u^2}{2}\right)}{\partial t} + \frac{\partial u \rho s\left(e + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2}\right)}{\partial x} = \Pi \dot{m} H - \Pi \alpha \left(T - T_w\right) - s\rho u g \sin\gamma, \tag{3}$$

$$\frac{\partial \rho_i s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_i s u}{\partial x} = \Pi \dot{m}_i, \qquad i = 1, ..., I-1 \tag{4}$$

$$\rho = \sum_{i=1}^{I} \rho_i, \tag{5}$$

$$p = \rho R T, \tag{6}$$

$$e = \frac{p}{\rho\left(k-1\right)},$$

где уравнения неразрывности (1), движения (2), энергии (3), и уравнения для парциальных плотностей компонент (4) записаны в предположении, что приход массы $\dot{m}$, $\dot{m}_i$ и энтальпии $H\dot{m}$ в поток осуществляется со стенок выработок. Уравнения записываются для всех прямолинейных участков сети выработок. В этих уравнениях x - координата; t - время; ρ - плотность газа; ρ_i - парциальные

плотности; u -скорость; p - давление; H - энтальпия массы, приходящей со стенок; T -температура; T_w - температура стенок; $s(x)$ - сечение, Π - периметр выработки; γ - угол наклона выработки к горизонту; k - показатель адиабаты газовой смеси, R - газовая постоянная; g -ускорение силы тяжести; τ_w -напряжение трения на стенках выработки; α - коэффициент теплоотдачи, I - число газовых компонент.

Коэффициент теплоотдачи вычисляется с учетом свободной и вынужденной конвекции газа в выработках по эмпирическим формулам, учитывающим наклон выработок. Для углов наклона выработок менее 45° к горизонту:

$$\mathrm{Nu}_F = 0.0214\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{0.4},\ \mathrm{Nu}_N = 0.817\mathrm{Ra}^{0.215}\left[1+\left(\frac{0.492}{\mathrm{Pr}}\right)^{9/16}\right]^{-0.382},$$

$$\mathrm{Nu} = \left(\mathrm{Nu}_F^3 + \mathrm{Nu}_N^3\right)^{1/3},\ \alpha = \frac{\mathrm{Nu}\,\lambda}{D_{eqv}},$$

где $\mathrm{Re} = \dfrac{D_{eqv} u \rho}{\mu}$, $\mathrm{Pr} = \dfrac{\mu C_p}{\lambda}$, $\mathrm{Ra} = \dfrac{g\rho^2 C_p \zeta \left(T_w - T_g\right) D_{eqv}^3}{\mu\lambda}$.

Для углов наклона выработок более 45° к горизонту:

$$\mathrm{Nu}_F = \frac{0.0357\,\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}^{1/3}\left(1+\mathrm{Pr}^{-5/6}\right)}{\ln\left(17\,\mathrm{Re}\right)},\quad \mathrm{Nu}_N = 0.15\mathrm{Ra}^{1/3}\left[1+\left(\frac{0.492}{\mathrm{Pr}}\right)^{9/16}\right]^{-16/27}.$$

Если потоки вынужденной и естественной конвекции сонаправлены, то $\mathrm{Nu} = \left|\mathrm{Nu}_F^3 + \mathrm{Nu}_N^3\right|^{1/3}$, если противонаправлены, то $\mathrm{Nu} = \left|\mathrm{Nu}_F^3 - \mathrm{Nu}_N^3\right|^{1/3}$, $\alpha = \dfrac{\mathrm{Nu}\,\lambda}{D_{eqv}}$.

Обозначения: Re - число Рейнольдса, Pr - число Прандтля, Ra - число Релея, Nu - число Нуссельта, D_{eqv} - эквивалентный диаметр выработки, C_p -удельная теплоемкость при постоянном давлении, ζ - коэффициент теплового расширения газа, λ, μ - коэффициенты теплопроводности и вязкости газа, α - коэффициент теплоотдачи.

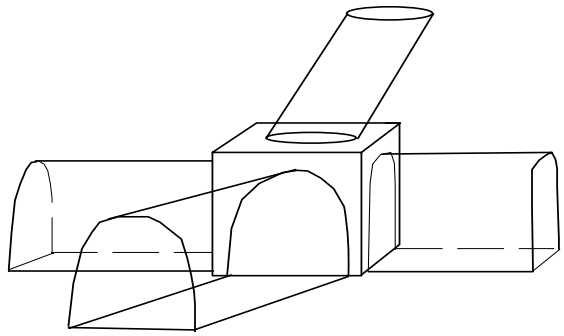


Рис. 1. Схематическое изображение узла с примыкающими выработками

Пересечения горных выработок будем представлять объемом заданной величины (на рисунке 1). Предполагая давление одинаковым по объему, смешение потоков из примыкающих выработок с разными концентрациями примесей происходит мгновенно, запишем законы сохранения массы, энергии и концентрации примесей для объема сопряжения в виде:

$$V\frac{d\rho}{dt} = \sum_k G_k\,, \tag{7}$$

$$V\frac{dE}{dt} = \sum_k G_k H_k\,, \tag{8}$$

$$V\frac{d\rho_i}{dt}=\sum_k G_{i,k}\,, \qquad i=1,...,I-1, \tag{9}$$

$$\rho=\sum_{i=1}^{I}\rho_i\,, \tag{10}$$

$$p=\rho RT\,. \tag{11}$$

В этих уравнениях: ρ - плотность газа в объеме V; $E=C_v\rho T$ - его внутренняя энергия; T - температура; ρ_i - парциальные плотности примесей; G_k - потоки массы между объемом V и примыкающей *k*-той выработкой; $H_k=C_pT_k$ - энтальпия газа в потоке G_k; $G_{i,k}$ - потоки массы примесей; суммы по *k* берутся по всем выработкам, примыкающим к объему V.

Уравнения (7) - (10) позволяют вычислить в объеме *k*-того узла газодинамические параметры ρ_k, ρ_{CH_4k}, ρ_{COk}, T_k. После этого давление p_k можно вычислить из уравнения состояния идеального газа (11).

Представленная модель расчета аэродинамических параметров в узле основана на законах сохранения массы и энергии. Изменение импульса в узлах не рассчитывается. Перенос импульса через сопряжения определяется заданием граничных условий на границах ветвей, примыкающих к узлу в соответствии с направлением характеристик.

В нестационарных условиях вентиляции температура стенок выработок меняется во времени и влияет на аэродинамику рудничной атмосферы. Так как наибольший градиент температуры формируется в направлении, перпендикулярном стенкам выработки, будем моделировать распространение тепла в горной породе от стенок выработки на основе одномерного уравнения теплопроводности в направлении перпендикулярном стенке во всех точках вдоль выработки, полагая в этих точках интенсивность теплообмена газа со стенками по периметру выработки одинаковой:

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\chi\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\,, \tag{12}$$

с начальными и граничными условиями:

$$T(x,y,0)=T_0\,,\quad \frac{\partial T(x,0,t)}{\partial y}=\alpha\left(T_g(x,t)-T(x,0,t)\right),\quad \frac{\partial T(x,\infty,t)}{\partial y}=0\,, \tag{13}$$

где χ - коэффициент температуропроводности горных пород, $\chi=\lambda_n/(c_n\rho_n)$, λ_n - коэффициент теплопроводности, c_n - удельная теплоемкость, ρ_n - плотность горных пород.

$T_g(x,t)$ - температура газа, определяется из решения системы уравнений (1)-(11). $T(x,0,t)$ - температура поверхности стенок выработок, определяется из решения уравнения (12) с краевыми условиями (13). Полученные значения $T(x,0,t)=T_w$ используются в модели (1) - (11). Поэтому уравнения (1) - (11) и (12)-(13) решаются совместно.

В качестве начальных условий для системы уравнений (1) - (11) задаются начальные распределения давления, температуры, скорости и концентрации метана в прямолинейных выработках:

$$p(x,0)=p_н\,,\ T(x,0)=T_н\,,\ u(x,0)=0\,,\ \rho_{CH_4}(x,0)=\rho_{CH_4 н}(x)\,,\ \rho_{CO}(x,0)=\rho_{COн}(x)\,, \qquad (14)$$

и параметры состояния газа в объемах сопряжений:

$$p_k(0)=p_н\,,\ T_k(0)=T_н\,,\ \rho_{CH_4 k}(0)=\rho_{CH_4 н k}\,,\ \rho_{CO k}(0)=\rho_{CO н k}\,, \qquad (15)$$

(индекс *н* соответствует начальным значениям параметров состояния рудничной атмосферы).

Граничные условия ставятся в зависимости от условий на границах прямолинейных выработок: Если границей выработки (ветви) является стенка, то ставится условие не протекания. Если границей выработки является выход выработки на поверхность в атмосферу, то граничные условия ставятся в зависимости от направления потока газа. Если на границе выработки установлен работающий вентилятор проветривания, то задаются скорость и энтропия воздуха, втекающего в выработку. Если граница ветви примыкает к узлу, то граничные условия ставятся в соответствии с направлением характеристик, и задаются давление и энтропия, либо только давление.

Таким образом, система уравнений (1)-(15) описывает нестационарное течение смеси газов в выработках с учетом тепло- и массообмена потока воздуха со стенками выработок.

Для численного решения системы уравнений (1)-(6) использовался метод С.К. Годунова распада произвольного разрыва. Обыкновенные дифференциальные уравнения (7) - (10) решались методом Эйлера. Уравнения теплопроводности (12) с граничными условиями (13) решались по неявной разностной схеме методом прогонки на неравномерной сетке, в которой шаг по пространству вглубь стенки увеличивался по геометрической прогрессии.

В третьей главе на основе разработанной математической модели и методики расчета проведено моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок на примере модельных сетей шахты. Представлены расчеты переноса метана при его выделении на выемочном участке. Представлен метод учета работы вентилятора местного проветривания (ВМП) и проведено моделирование проветривания тупиковой выработки с помощью ВМП.

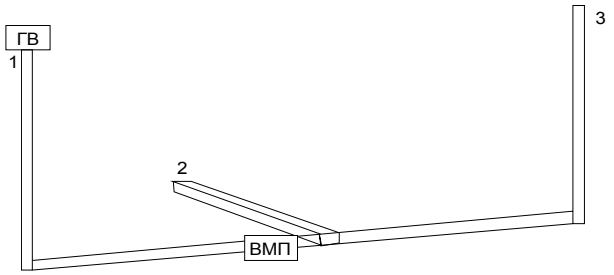


Рис. 2. Участок сети выработок. ГВ – главный вентилятор проветривания, ВМП – вентилятор местного проветривания. *1* – начало вертикальной выработки, где установлен ГВ, *2* – тупиковая выработка, *3* – выход в атмосферу

Расчеты проветривания тупика с помощью ВМП проводились для модельного участка сети выработок, представленного на рисунке 2. Длина маршрута *1-3* – 1000 м, длина маршрута *2-3* – 700 м. Длины вертикальных выработок – 100 м, длина тупиковой выработки 200 м. Площадь сечений выработок была принята 10 м^2.

В тупиковой выработке задавалась повышенная концентрация метана ($\rho_{CH4}(x)=0.03$). В заданный момент времени на фоне стационарного режима проветривания сети в работу включается ВМП, установленный в выработке со свежей струей воздуха, на расстоянии 10 м от сопряжения с тупиковой выработкой. Расчеты проведены для различных ве-

личин расхода воздуха, обеспечиваемого ВМП. Результаты представлены на рисунке 3.

После включения ВМП уменьшается скорость движения воздуха в локальной области между ВМП и устьем тупиковой выработки (рис. 3 в, кривые 2), в месте установки ВМП локально понижается давление (рис. 3 а). Из тупиковой выработки постепенно происходит вытеснение рудничной атмосферы с повышенным содержанием метана (рис. 3, д, е). В зоне сопряжения происходит перемешивание струи газа из тупика и к выходу в атмосферу идет вентиляционная струя с пониженной концентрацией метана.

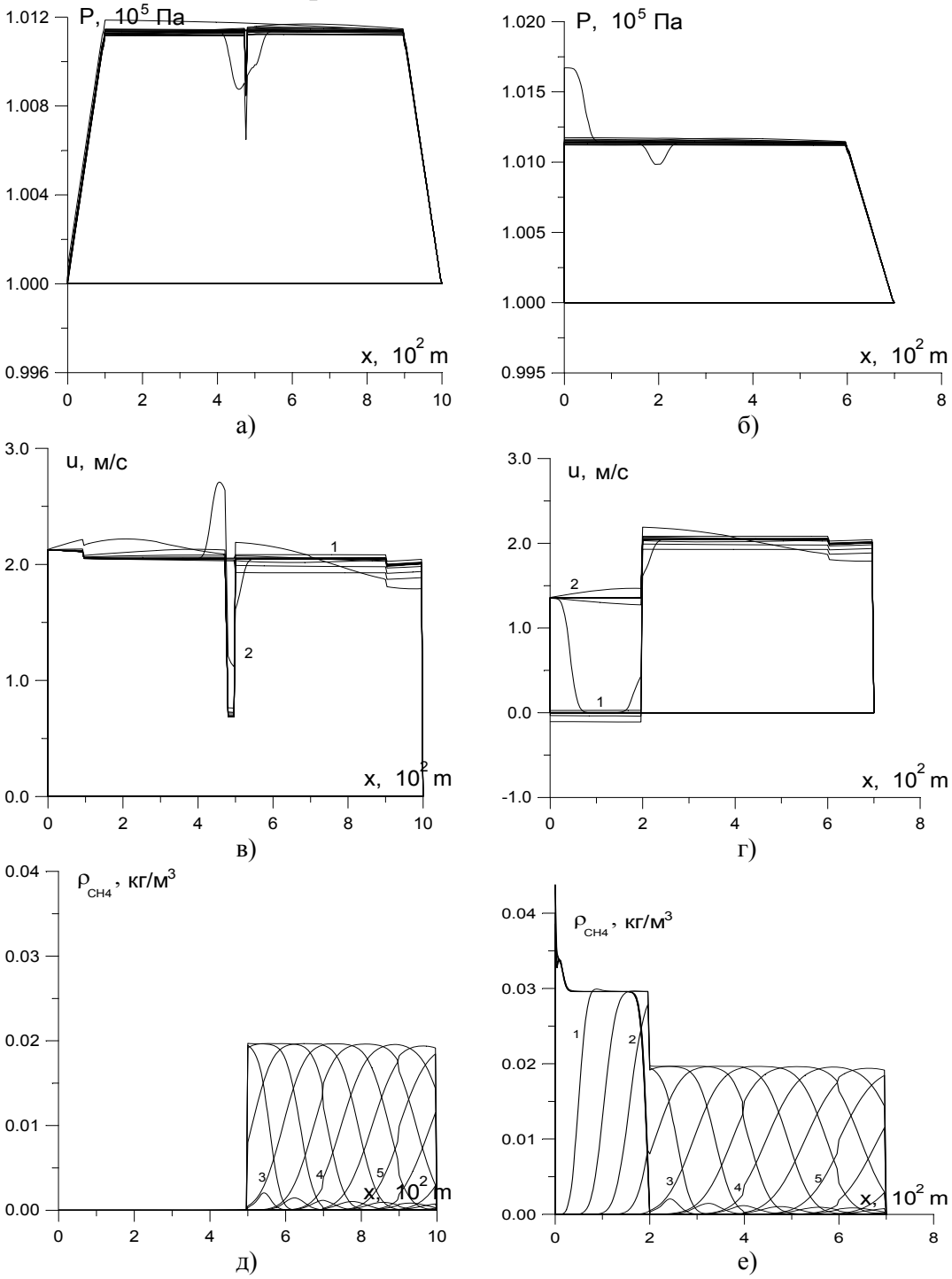


Рис. 3. Распределения давления, скорости, плотности метана по маршруту *1-3* (*а, в, д*) и маршруту *2-3* (*б, г, е*). Кривые построены в последовательные моменты времени через 80 с. $G_{ВМП} = 12.5\ м^3/с$

В случае, когда производительность ВМП больше, чем величина вентиляционного потока подходящего к ВМП, то в локальной области между ВМП и устьем тупиковой выработки рудничная атмосфера будет двигаться от устья тупиковой выработкой к ВМП. Этот поток содержит некоторое количество метана, который снова возвращается в тупиковую выработку. Поэтому производительность ВМП не должна быть больше 70% от величины вентиляционного потока подходящего к ВМП.

Проведено моделирование работы газоотсасывающей установки, установленной на поверхности, для организации управления газовыделением на выемочном участке с использованием поддерживаемых газодренажных выработок. Показано, что газоотсасывающая установка эффективно перераспределяет потоки рудничной атмосферы на выемочном участке и уменьшает концентрацию метана в очистной выработке. Однако в случаях, когда производительность ГОВУ будет меньше расхода воздуха, который поступает в выработанное пространство за счёт работы вентилятора главного проветривания, использование ГОВУ становится неэффективным.

Проведено моделирование нестационарных процессов переноса метана в условиях реверсирования вентилятора главного проветривания. Показано, что установление стационарного течения рудничной атмосферы происходит в несколько раз быстрее, чем установление стационарного распределения концентрации метана в выработках. При этом в период установления стационарного распределения концентрации метана в выработках возможно локальное увеличение его концентрации в несколько раз.

Моделирование проведено на примере модельной сети выработок, представленной на рисунке 4. Длины выработок были приняты: *1-2* – 100 м, *2-3* – 1000 м, *3-4* – 1000 м, *4-5* – 400 м, *5-6* – 1000 м, *3-6* – 400 м, *6-8* – 1000 м, *8-9* – 100 м, *5-7* – 1000 м, *7-10* – 100 м, площади проходного сечения выработок – 10 м^2, периметр – 12 м. Коэффициент аэродинамического сопротивления в выработках был принят одинаковым для всех выработок. Предполагалось, что в выработках *4-5*, *5-6* (на рис. 4) происходит приток метана в вентиляционный поток. В точке *10* выход в атмосферу отсутствует (точка *10* - тупик). После установления стационарного проветривания (в расчетах установление стационарного режима проветривания в выбранной модельной сети происходит за 3000 с) вентилятор главный проветривания переходит в реверсивный режим. Предполагается, что вентилятор главный проветривания обеспечивает скорость потока газа в реверсивном режиме такую же, что и в нормальном (в расчетах принято 2.07 м/с). Результаты расчетов представлены на рисунке 5. Здесь представлены установив-

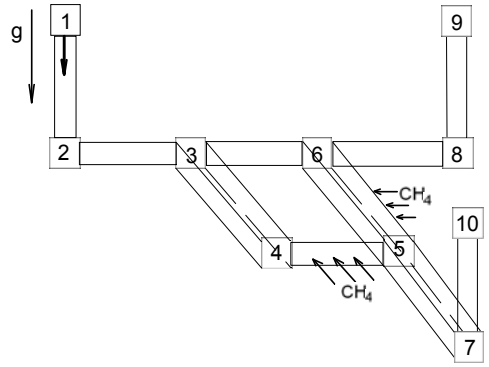
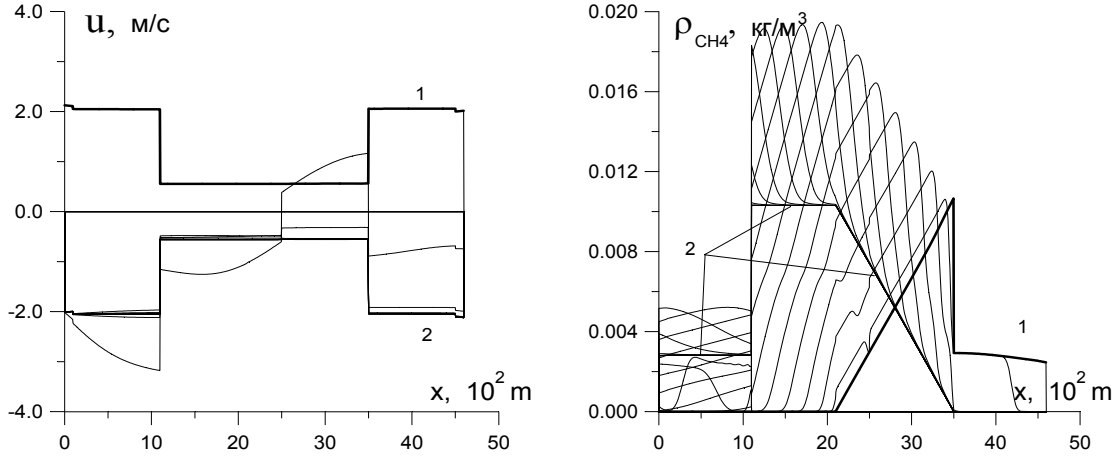
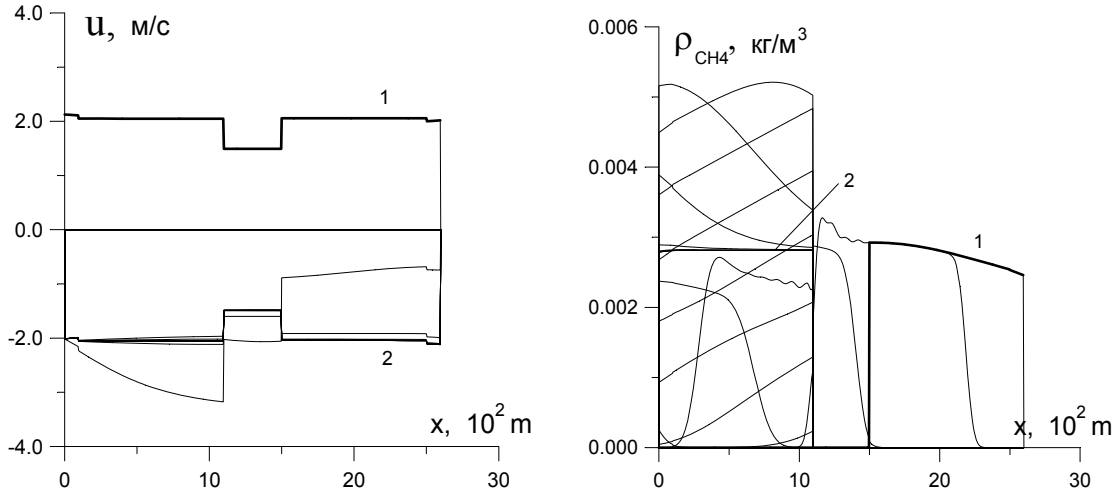


Рис. 4. Схема модельной сети выработок угольной шахты

шиеся распределения скорости и парциальной плотности метана в выработках на маршрутах I – *1-2-3-4-5-6-8-9*, II – *1-2-3-6-8-9*.



а)



б)

Рис. 5. Установившиеся распределения скорости и парциальной плотности метана до реверсирования вентилятора главного проветривания (кривые 1) и после реверсирования (кривые 2). Промежуточные кривые построены в моменты времени через 400 с, начиная с момента переключения главного вентилятора. Маршруты а) I – *1-2-3-4-5-6-8-9,* б) II – *1-2-3-6-8-9*

Установление стационарного распределения газодинамических параметров после реверсирования вентилятора главного проветривания происходит относительно быстро – за время 1200-1500 с для выбранной сети выработок. Однако установление стационарного распределения метана в выработках происходит за время много большее, ~6000 с. В выработках *3-4, 4-5, 5-6* некоторое время наблюдается повышенная практически в два раза концентрация метана в период установления после реверсирования. Это объясняется тем, что вентиляционный поток дважды проходит выработки, в которых происходит приток метана в вентиляционный поток. В отличие от нормального режима проветривания при реверсировании после установления в выработке *3-4* наблюдается повышенная концентрация метана.

Проведено моделирование переноса метана и потокораспределения при вентиляции в выработках угольной шахты для различных комбинаций расстановки вентиляционных перемычек. Разработанный подход позволяет решать задачи

управления вентиляцией сети выработок угольной шахты с помощью расстановки в сети вентиляционных сооружений.

Представленные в третьей главе диссертации результаты решения конкретных задач на примере модельных сетей выработок угольной шахты показывают, что разработанная методика для расчета нестационарных аэрогазодинамических процессов вентиляции сети выработок угольных шахт позволяет проводить расчёт нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольных шахт.

Разработанная методика учитывает реальную топологию сети выработок угольных шахт (длины и площади поперечных сечений выработок, переменность площади сечения выработок, углы наклона и сопряжения выработок, выходы на поверхность); характеристики вентилятора главного проветривания; газоотсасывающие установки; вентиляторы местного проветривания; расположение вентиляционных сооружений, взрывоустойчивых перемычек, водоналивных взрывозащитных перемычек, взрывозащитных парашютных перемычек, если они развернуты; искусственно создаваемые при угрозе взрыва завалы выработок; загромождение выработок оборудованием; нестационарный теплообмен потока газа со стенками выработок; метановыделение со стенок выработок; перенос локальных скоплений метана, если они заданы в начальных условиях.

Проведено численное моделирование и представлены результаты расчетов проветривания тупиковой выработки в двухмерном приближении, проанализирована динамика и структура течения по длине выработки при вытеснении метановоздушной смеси из тупика.

В четвертой главе на основе разработанной математической модели и методики расчета проведено моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок при возникновении и постепенном развитии пожара.

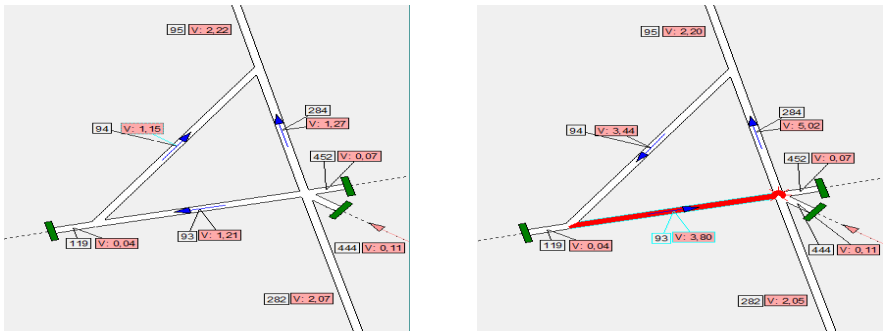
Возникновение очагов возгорания приводит к повышению температуры рудничной атмосферы, нарушению проветривания, загазованию рудничной атмосферы газообразными продуктами сгорания. Развитие очага горения нарушает нормальный режим проветривания шахты, может приводить к изменению направления движения рудничной атмосферы в выработках, в особенности в наклонных. Развитие очага пожара будет определяться движением горячих газообразных продуктов сгорания, разогревающих по ходу своего движения горючие материалы до температуры воспламенения. Все эти особенности могут быть рассчитаны только на основании математических моделей нестационарной аэродинамики рудничной атмосферы.

В четвертой главе диссертации представлены результаты моделирования взаимовлияния аэродинамики рудничной атмосферы на развитие пожара и влияние пожара на аэродинамику.

Приведены результаты моделирования нестационарных процессов в рудничной атмосфере при возникновении пожара в наклонной выработке. Показано, что существенные изменения потока воздуха, опрокидывание проветривания могут происходить при возникновении пожара даже на небольшом участке наклонной выработки.

На основе математической модели (1)-(15) были проведены расчеты проветривания участка сети выработок шахты «Тагарыжская», представленного на рисунке 6. Угол наклона к горизонту участка *284* составляет 20 ^{o}, участок *93* наклонен к горизонту под углом -5 ^{o}. В расчетах было принято, что при нормальном установившемся проветривании на участке *93* возник пожар. Пожар моделируется повышением температуры стенок выработки до температуры горения.

Результаты расчетов представлены на рис. 7 в виде распределений скорости и температуры газа по маршруту I (*284-94-93-284*) и маршруту II (*284*).



а) *б)*

Рис. 6. Распределение потоков воздуха, *а* – до пожара, *б* – во время пожара. Стрелками показано направление вентиляционных потоков до пожара

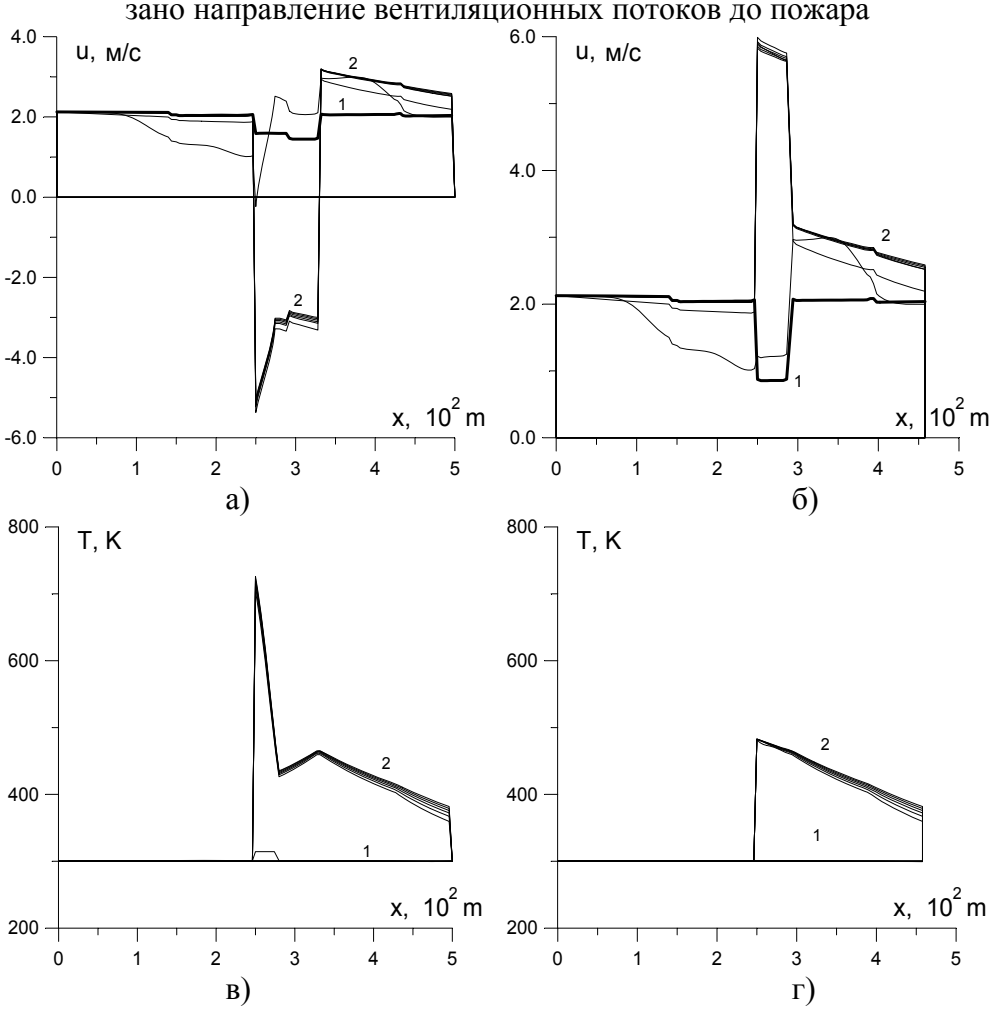


Рис. 7. Распределения скорости газа по маршрутам I (*а*) и II (*б*) и температуры газа по маршрутам I (*в*) и II (*г*). *1* – установившиеся значения до пожара, группа линий *2* – после начала пожара

Толстой сплошной линией *1* на рис. 7 а, б представлены установившиеся распределения скорости вентиляционного потока в стационарном режиме проветривания до пожара, группы линий *2* (после начала пожара) построены через промежутки времени 200 секунд.

На рисунке 7 видно, что после начала пожара на участке *93-94* маршрута I происходит быстрое изменение направления движения газа. Газ при движении на участке *93* нагревается (на рисунке 7 в), и на него начинают действовать силы Архимеда, вызывающие свободно конвективное восходящее движение газа. В результате их действия поток газа на участке *93-94* меняет свое направление, а на участке *284* скорость движения газа увеличивается. На участке *93-94-284* возникает рециркуляция движения газообразных продуктов горения. Через 10 минут устанавливается квазистационарное течение газа на аварийном участке вентиляционной сети. Нестационарность процесса определяется постепенным разогревом стенок выработок пожарными газами на участках *94* и *284* (на рисунке 6), поэтому скорость движения газа на участке *284* за сопряжением с участком *94* медленно меняется со временем.

В п. 4.3 диссертации представлены результаты моделирования нестационарных процессов изменения рудничной атмосферы в выработках шахты и развития очага пожара в модельной сети выработок учитывающее обратное влияние перераспределения потоков рудничной атмосферы на развитие очага пожара. Направление и скорость потоков горячих газообразных продуктов горения определяет характер развития пожара в сети выработок. Численно проанализировано влияние места установки вентиляционных сооружений в сети выработок на развитие очага пожара. В зависимости от места их установки развитие очага пожара может ускориться или замедлиться. Показано, что использование вентиляционных сооружений может существенно повлиять на скорость развития пожара и пути распространения пожарных газов.

Развитие очага пожара при возникновении его в наклонной выработке происходит в условиях сильного восходящего естественно-конвективного движения газообразных продуктов сгорания. В наклонной выработке скорость распространения пожара существенно выше, чем в горизонтальной. Параметрическими расчетами установлено, что расстановка вентиляционных сооружений существенно влияет на скорость развития пожара.

Расчеты, проведенные на основе нестационарной газодинамической модели вентиляции на примере шахты «Тагарыжская», а также другие модельные расчеты показали, что аварийные режимы проветривания характеризуются наличием множества переходных процессов. Такие процессы могут быть описаны нестационарными физико-математическими моделями на основе уравнений газовой динамики.

З А К Л Ю Ч Е Н И Е

В диссертационной работе на основании выполненных теоретических исследований решена актуальная научно-техническая задача - разработан газодинамический подход, позволяющий анализировать нестационарные аэродинамические процессы вентиляции сети выработок угольной шахты, возникающие при

изменении режимов работы вентиляционного оборудования, при возникновении и развитии пожаров в выработках. Внедрение результатов исследований может повысить эффективность и безопасность ведения горных работ, в том числе при ликвидации подземных аварий.

Основные научные результаты, выводы и практические рекомендации заключаются в следующем:

1. Разработана математическая модель нестационарных процессов вентиляции горных выработок. Математическая модель основана на нестационарных уравнениях газовой динамики. Она учитывает выделение метана со стенок выработок, переменную концентрацию метана, переменную концентрацию газообразных продуктов сгорания в случае возникновения очагов пожара в выработках, теплообмен газа со стенками выработок, реальную топологию сети горных выработок, наличие вентиляционных сооружений и реальные поперечные сечения выработок, работу вентилятора главного проветривания, газоотсасывающих установок, вентиляторов местного проветривания.

2. На основе разработанной математической модели нестационарных процессов проветривания сети выработок угольных шахт проведено моделирование вытеснения метана из загазованных выработок модельной сети.

Проведено моделирование работы газоотсасывающей установки. Показано, что газоотсасывающая установка эффективно перераспределяет потоки рудничной атмосферы и уменьшает концентрацию метана в рудничной атмосфере. Однако в некоторых случаях возможны ситуации, когда газоотсасывающая установка тормозит естественный ток воздуха в смеси с метаном, и тогда ее использование становится неэффективным.

Проведено моделирование нестационарных процессов переноса метана в условиях реверсирования главного вентилятора. Показано, что реверсирование вентилятора главного проветривания приводит к возникновению в сети выработок локального увеличения концентрации метана в несколько раз.

Разработан подход и проведено моделирование проветривания тупиковой выработки в сети выработок вентилятором местного проветривания. Проведено численное моделирование проветривания тупиковой выработки в двухмерном приближении, проанализирована динамика, и структура движения воздуха по длине выработки при вытеснении метановоздушной смеси из тупика.

3. Проведено моделирование нестационарных аэродинамических процессов в выработках шахты при возникновении пожара в наклонной выработке. Показано, что опрокидывание проветривания может происходить при возникновении пожара на небольшом участке наклонной выработки. Проведено моделирование нестационарных аэродинамических процессов в выработках шахты и развития очага пожара в модельной сети выработок, учитывающее обратное влияние потоков рудничной атмосферы на развитие очага пожара. Направление и скорость движения потоков горячих газообразных продуктов горения определяет характер развития пожара в сети выработок. Развитие очага пожара в наклонной выработке происходит в условиях сильного восходящего естественно-конвективного движения продуктов сгорания. В наклонной выработке скорость распространения пожара существенно выше, чем в горизонтальной.

4. Проведено моделирование влияния места установки вентиляционных сооружений в сети выработок на развитие очага пожара. В зависимости от места их установки развитие очага пожара может ускориться или замедлиться. Показано, что использование вентиляционных сооружений может существенно повлиять на скорость развития пожара и пути распространения пожарных газов.

5. Расчеты, проведенные на основе нестационарной газодинамической модели вентиляции показали, что аварийные режимы проветривания характеризуются наличием множества переходных процессов. Предложенная модель возникновения пожара в выработке позволяет рассчитывать развитие пожара и аварийные режимы проветривания в реальном времени, что очень важно при планировании горноспасательных работ.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. *Костеренко В.Н.* Программное обеспечение инженерных расчётов из Устава ВГСЧ / Д.Ю. Палеев, В.Н. Костеренко // Тез. докл. Всерос. науч.-практ. конф. «Промышленная безопасность», 10 дек. 2001 г., г. Москва. – М., 2001. – С. 85–86.

2. *Костеренко В.Н.* Расчёт проветривания угольных шахт на основе закона сохранения масс в узлах сети / Д.Ю. Палеев, В.Н. Костеренко // Тез. докл. Всерос. науч.-практ. конф. «Промышленная безопасность», 10 дек. 2001 г., г. Москва. – М., 2001. – С. 87–89.

3. ***Костеренко В.Н.* Взаимодействие ударных волн в горных выработках с водяными и сланцевыми заслонами / Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов, В.Н. Костеренко и др. // Безопасность жизнедеятельности. – 2002. – № 7.**

4. *Костеренко В.Н.* Комплекс программ для решения задач вентиляции, водоснабжения и расчета распространения воздушных ударных волн по горным выработкам / И.М. Васенин, В.Н. Костеренко, А.Ю. Крайнов и др. // Тез. докл. XII Междунар. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, Владимир, 30 июня – 5 июля 2003 г. – М.: Изд-во МАИ, 2003. – Т. 1. – С. 137–138.

5. *Костеренко В.Н.* Методика газодинамического расчёта параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли / В.А. Горбатов, Ю.Ф. Руденко, В.Н. Костеренко, Д.Ю. Палеев и др. // Госгортехнадзор России: Утв. 29.04.04. № АС-04-35/395. – М., 2004. – 25 с.

6. *Костеренко В.Н.* Газодинамический метод расчёта зон поражения при взрывах газа и пыли в угольных шахтах / И.М. Васенин, В.А. Горбатов, В.Н. Костеренко и др. // Науч. сообщения ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского. 2004. – Вып. 327. – С. 71–82.

7. ***Костеренко В.Н.* Автоматизация расчёта зон поражения при взрывах метана и угольной пыли в шахтах / Д.Ю. Палеев, В.Н. Костеренко, О.Ю. Лукашов // Вестник МАНЭБ. – 2005. – Т. 9, № 9. – С. 141–145.**

8. ***Костеренко В.Н.*** **Недостатки применения комбинированного способа проветривания / С.П. Брабандер, В.Н. Костеренко, Д.Ю. Палеев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. № 2006 2(53), С. 9-12.**

9. *Костеренко В.Н.* Анализ причин возникновения взрывов на угольных шахтах России / Д.Ю. Палеев, В.Н. Костеренко // Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. Материалы межд. научно-практ. конференции. Новокузнецк, 2006 г. С. 153-155.

10. *Костеренко В.Н.* Состояние аэрологической безопасности ведения горных работ на угольных шахтах России / Д.Ю. Палеев, В.Н. Костеренко // Безопасность жизнедеятельности предприятий топливно-энергетического комплекса России. Материалы X международной научно-практической конференции, проведённой в рамках ежегодных научных чтений МАНЭБ «Белые ночи», 13-16 июня 2006. Кемерово-Санкт-Петербург, 2006 г. С. 138-141.

11. Математическое моделирование горения и взрыва высокоэнергетических систем / Под ред. И.М. Васенина. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. – 322 с.

12. Проблемы и перспективы обеспечения безопасности на угольных предприятиях / В.В. Рашевский, В.Б. Артемьев, Ю.Ф. Руденко, *Костеренко В.Н.*, Д.Ю. Палеев , И.М. Васенин, Э.Р. Шрагер, А.Ю.Крайнов // Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. – 100 с.

13. *Костеренко В.Н.* О математических моделях взрыва (вспышки) в горных выработках угольных шахт / И.М. Васенин, Д.Ю. Палеев, Ю.Ф. Руденко, В.Н. Костеренко, А.Ю. Крайнов, О.Ю. Лукашов, Э.Р. Шрагер // Известия вузов. Физика. 2008. Т. 51, №8. с. 95-100.

14. *Костеренко В.Н.* Программные комплексы обеспечения безопасности при нормальных и аварийных режимах работы угольных шахт России / Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов, Ю.Ф. Руденко, В.Н. Костеренко // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Труды X межд. научно-практ. конф. - Кемерово: ИУУ СО РАН, 2008.- С. 43-45.

15. *Костеренко В.Н.* Задание начального объема загазования горных выработок для определения зон поражения при взрыве / Д.Ю. Палеев, Ю.Ф. Руденко, В.Н. Костеренко // Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент: Материалы 6-й международной научной конференции. – Астана: Изд-во ЕНУ, 2008. с. 281-284.

16. ***Костеренко В.Н.*** **Состояние и перспективы внедрения компьютерных программ обеспечения безопасности на угольных шахтах России / Д.Ю. Палеев, Ю.Ф. Руденко, В.Н. Костеренко // Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2008.-№ ОВ7. С. 164-169.**

17. *Костеренко В.Н.* Разработка новой технологии моделирования аварийных процессов, происходящих в горных выработках угольных шахт / Д.Ю. Палеев, Ю.Ф. Руденко, В.Н. Костеренко // Хаос и структуры в нелинейных системах.

Теория и эксперимент: Материалы 6-й международной научной конференции. – Астана: Изд-во ЕНУ. 2008.- С. 278-281.

18. *Костеренко В.Н.* Моделирование аварийных ситуаций в горных выработках угольных шахт / Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов, В.Н. Костеренко, А.Н. Тимченко // Депозитарий издательства МГГУ. Справка №734/02-10 от 01.10.2009. (6 стр.)

19. *Костеренко В.Н.* Газодинамический метод расчета нестационарного проветривания угольной шахты / Э.Р. Шрагер, А.Ю. Крайнов, И.М. Васенин, Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов, А.Н. Тимченко, В.Н. Костеренко // Материалы "Всероссийской научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора М.С. Горохова - основателя томской школы баллистики. Томск: Издательство Томского университета, 2009. С. 43–45.

20. *Костеренко В.Н.* Исследование нестационарных аэродинамических процессов, возникающих при пожаре в наклонной выработке угольной шахты / О.Ю. Лукашов, А.А. Глазунов, А.Ю. Крайнов, В.Н. Костеренко // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2009, Т. 52, № 7/2, С. 142-145.

21. *Костеренко В.Н.* Моделирование процесса проветривания тупиковой выработки угольной шахты / И.М. Васенин, В.Н. Костеренко, А.Ю. Крайнов, О.Ю. Лукашов, Д.Ю. Палеев, Э.Р. Шрагер // Байкальские чтения: Наноструктурные системы и актуальные проблемы механики сплошной среды (теория и эксперимент): Тезисы докладов научной конференции. (Улан-Удэ,19-22 июля 2010 г.). Ижевск, ИПМ УрО РАН. 2010. с. 124-128.

22. *Костеренко В.Н.* Расчёт воздухораспределения в горных выработках на основе уравнений газовой динамики в нестационарной постановке / В.Н. Костеренко, И.М. Васенин, Д.Ю. Палеев, В.В. Ващилов // Труды конференции с участием иностранных учёных «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды» (28 июня - 2 июля 2010 г.). В III т. Т. II. Геотехнологии. - Новосибирск: Институт горного дела СО РАН, 2010. С. 238-244.

23. *Костеренко В.Н.* Моделирование пожара в сети горных выработок / В.Н. Костеренко, Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов // Труды конференции с участием иностранных учёных «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды» (28 июня - 2 июля 2010 г.). В III т. Т. II. Геотехнологии. - Новосибирск: Институт горного дела СО РАН, 2010. С. 220-226.