

*На правах рукописи*



**ГОВОРУХИН Юрий Михайлович**

**МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕМ  
ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ**

Специальность 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород,  
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика (технические науки)»

**Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук**

Москва, 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки  
Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова  
Российской академии наук (ИПКОН РАН)

**Научный консультант:**

**КУБРИН Сергей Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Геотехнологических рисков при освоении газоносных угольных и рудных месторождений отдела № 2 «Центр проблем метана и газодинамических явлений угольных и рудных месторождений» ИПКОН РАН.

**Официальные оппоненты:**

**МИНЬКОВ Леонид Леонидович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры Математической физики Физико-технического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

**КОБЫЛКИН Сергей Сергеевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Безопасности и экологии горного производства НИТУ «МИСИС».

**АНДРЕЙКО Сергей Семенович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории Геотехнологических процессов и рудничной газодинамики «ГИ УрО РАН».

**Ведущая организация** – Акционерное общество «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли».

Защита диссертации состоится «10» июня 2026 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.1.096.02 при ИПКОН РАН по адресу: 111020, г. Москва, Крюковский тупик, д. 4; тел./факс 8(495)360-89-60.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять в адрес совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПКОН РАН и на сайте [www.ипконран.рф](http://www.ипконран.рф).

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук

В.С. Федотенко

**Актуальность работы.** В современных условиях подземная добыча угля механизированными комплексами в очистных забоях длиной 150 м и более связана с ограничениями по газовому фактору. В следствии реализации прогрессивных технологических схем, обеспечивающих концентрацию основных процессов, наращивания интенсификации горных работ за счёт увеличения длин подготавливаемых выемочных столбов (до 4500 м), очистных забоев (до 500 м), а также внедрения высокопроизводительного оборудования, позволяющего проводить выработки с темпом, равным 300 м/мес (до 1 км/мес) и доводить нагрузку на очистные забои до 25-35 тыс. т/сут, значительно возросла абсолютная газообильность как действующих очистных выработок (до 20-25 м<sup>3</sup>/мин), так и выработанных пространств (до 100-120 м<sup>3</sup>/мин и более). Повышенные дебиты метана связаны в том числе с увеличением глубины ведения горных работ (до 1 км и более) и связанной с ней газоносностью слоёв геомассива. Высокие скорости подвигания очистных забоев при управлении кровлей полным обрушением приводят к комплексному многопараметрическому взаимодействию в пространстве и времени геомеханических и аэрогазодинамических процессов. Это обуславливает возникновение так называемого «газового барьера», для преодоления которого разработаны вариативные решения. Созданы различные схемы проветривания выемочных участков и способы дегазации, а также увеличены площади поперечного сечения выработок до 20-30 м<sup>2</sup> и более для обеспечения большего расхода воздуха в очистной выработке, обособленного проветривания и «аэродинамической изоляции» отработанных пространств при реализации комбинированных схем проветривания.

Выемочные участки с точки зрения аэрогазодинамических процессов являются динамическими системами со множеством взаимосвязанных и изменяющихся элементов. Указанные выше осложняющие факторы детерминируют барьер в технологической схеме предприятия по фактору метанобезопасности и накладывают ограничения на ритмичную и эффективную работу очистного оборудования в забоях, отрабатывающих высокогазоносные пологие пласты. В связи с этим требуется разработка и внедрение эффективных систем управления газовыделением. Определяющее влияние на процессы проветривания участков выработок и разжижения выделяющихся в них вредностей до безопасных концентраций оказывают зоны обрушения, возникающие в процессе сдвижения геомассива при отработке выемочных столбов. В процессе структурного преобразования пород, их обрушения и дезинтегрирования возникают так называемые «купола» зоны обрушения, в которые может выделяться и накапливаться метан, т. е. происходит образование техногенного резервуара метана, называемого также газовым коллектором. Из него газ вместе с утечками воздуха может поступать в действующие выработки, а также интенсивно вытесняться при посадках консолей кровли. Кроме того, с расширением применения технологических схем многоштрековой подготовки выемочных столбов произошёл рост количества сопряжений оконтуривающих выработок с подготовительными и, соответственно, числа перемычек, которые впоследствии необходимо возвести при изоляции отработанного участка пласта. Образующиеся пространства (тупики) между перемычками и действующими сквозными горными выработками проветриваются за счёт турбулентной диффузии. В них при недостаточности проветривания и поступлении метана возможно образование его локальных скоплений.

Указанное выше подтверждается техногенными авариями, произошедшими на опасных производственных объектах ведения подземных горных работ по добыче угля и связанных со взрывами метановоздушных смесей и угольной пыли: ш. Зырянская (02.12.1997); ш. Тайжина (10.04.2004); ш. Есаульская (09.02.2005); ш. Ульяновская (19.03.2007); ш. Юбилейная (24.05.2007); ш. Распадская (08.05.2010); ш. Северная (25.02.2016); ш. Листвяжная (25.11.2021). Основными причинами стало формирование локальных скоплений метана в участках выработках, а также наличие газового коллектора в куполах зон обрушения и вытеснение метана из них в очистные выработки при посадках консолей кровли, что происходит при низкой эффективности существующих систем управления газовыделением. Таким образом, разработка методологии управления газовыделением на выемочных участках при высокоинтенсивной отработке пологих пластов очистными забоями, оборудованными механизированными комплексами, является актуальной научной проблемой.

Проблемами проветривания горных выработок, проницаемости высокопористых сред, фильтрации метановоздушных смесей и формирования в куполах зон обрушения газового коллектора занимались такие видные отечественные и зарубежные исследователи, как: А.А. Скочинский, Ф.А. Абрамов, С.С. Андрейко, И.Е. Болбат, В.Н. Воронин, Л.Д. Воронина, А.С. Воронюк, Е.И. Глузберг, Н.Ф. Гращенков, А.Ф.Г. Дарси, В.А. Емельянов, В.Н. Захаров, И.Е. Идельчик, Н.О. Каледина, Т. фон Карман, А.М. Карпов, Н.М. Качурин, В.В. Кашибадзе, Ф.С. Клебанов, С.С. Кобылкин, В.А. Колмаков, В.Б. Комаров, А.Ю. Крайнов, Ю.В. Круглов, А.И. Ксенофонтова, С.С. Кубрин, С.В. Кузнецов, Г.М. Ломизе, О.Н. Малинникова, И.Д. Машенко, А.Ф. Милетич, М.Д. Миллионщиков, Л.Л. Миньков, П.И. Мустель, А.А. Мясников, И. Никурадзе, М.М. Ольвовский, Л.Д. Павлова, Д.Ю. Палеев, М.А. Петрушев, И.М. Печук, Г.Я. Полевщиков, Л. Прандтль, Л.А. Пучков, О. Рейнольдс, Е.И. Рогов, Г.Г. Стекольщиков, О.В. Тайлаков, Б.Г. Тарасов, А.М. Тимошенко, В.А. Трофимов, К.З. Ушаков, В.Н. Фрянов, В.Н. Щелкачев, G.S. Esterhuizen, C.J. Hall, H.L. Hartman, C.O. Karacan, R. Kharkar, G.E. McElroy, M.J. McPherson, B.R. Pursall, M.O. Rahim, T.X. Ren, A.C. Smith, A.M. Wala, L. Yuan и многие др.

Существенный вклад в изучение геомеханических процессов, протекающих при формировании как зон обрушения, так и в целом зон сдвижения внесли такие видные отечественные и зарубежные исследователи, как: С.Г. Авершин, И.В. Баклашов, А.А. Борисов, П.В. Егоров, Ж.С. Ержанов, Л.В. Ершов, В.Н. Захаров, Ж.М. Канлыбаева, Б.А. Картозия, Н.М. Качурин, Г.Н. Кузнецов, С.Т. Кузнецов, В.И. Мурашев, Л.Д. Павлова, М.В. Рыльникова, В.Д. Слесарев, Б.Г. Тарасов, В.А. Трофимов, В.Н. Фрянов, Г.Г. Штумпф, О. Якоби, G.S. Esterhuizen, C.O. Karacan, S.W. Kingman, I.S. Lowndes, M.D.G. Salamon, D.N. Whittles и многие др.

**Связь темы диссертации с научно-техническими программами.** Научные исследования проведены в рамках:

- поисковой научно-исследовательской работы «Разработка и реализация газодинамической модели формирования газового коллектора и миграции газовоздушной смеси в выемочном участке при отработке свиты угольных пластов по интенсивным технологиям», выполненной согласно государственному контракту от 31.03.2010 № П41 (Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы»);

- научно-исследовательской работы «Разработка Единой методики по определению загазованных взрывчатой смесью объёмов, принимаемых для расчёта силы взрыва и последующего распространения поражающих факторов по горным выработкам» (НИР «Сила взрыва»), выполненной согласно п.1 раздела XII Плана научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ МЧС России на 2019 год и плановый период 2020 и 2021 годов (Рег. № НИОКТР АААА-А19-119042390006-9, Рег. № ИКРБС АААА-Б19-219121090042-1);

- научно-исследовательской работы «Исследование и обоснование эффективности применения моделей шахтных вентиляционных сетей при решении комплекса задач научного, экспертного и инженерного сопровождения аварийно-спасательных работ» (НИР «Эффективность ШВС»), выполненной согласно п. 1 раздела X Плана научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ МЧС России на 2021 год и плановый период 2022 и 2023 годов (Рег. № НИОКТР 121030500080-4, Рег. № ИКРБС 221120100162-8);

- научно-исследовательской работы «Разработка научно обоснованных предложений по прогнозу, оценке источников, мощности и поражающих факторов взрывов метанопылевоздушных смесей в горных выработках угольных шахт», выполненной ИПКОН РАН по заказу Министерства энергетики Российской Федерации в 2022-2023 годах согласно государственному контракту № 0173100008322000063/К/12 от 31.10.2022 (Рег. № НИОКТР 122120100056-0);

- научно-исследовательской работы «FMMS-2024-0008 Разработка фундаментальных основ возникновения, развития и прогнозирования катастрофических многофазных процессов в техногенно изменяемом массиве горных пород», выполняемой ИПКОН РАН в 2024-2025 гг.

**Объектом исследования** являются геомеханические и аэрогазодинамические процессы, происходящие в подземных горных выработках и зоне обрушения геомассива в границах вые-

мочных участков на пологих пластах, обрабатываемых механизированными комплексами в очистных забоях длиной 150 и более метров.

**Предметом исследования** являются закономерности протекания геомеханических и аэрогазодинамических процессов при формировании высокопроницаемого участка дезинтегрированных пород в зоне обрушения и образовании газового коллектора, изменения аэродинамических сопротивлений трения подземных горных выработок с сечением свыше  $16 \text{ м}^2$ , проветривания тупиков за счёт турбулентной диффузии.

**Целью работы** является разработка методологии управления газовой выделением на выемочных участках при высокоинтенсивной обработке пологих угольных пластов очистными забоями, оборудованными механизированными комплексами, обеспечивающей нормативный уровень безопасности и ритмичность добычи угля.

**Идея работы** заключается в использовании закономерностей взаимовлияния геомеханических и аэрогазодинамических процессов в системе «горные выработки – зона обрушения – дезинтегрированные породы – источники метановыделения».

Для достижения поставленной цели при исследовании в диссертации решены следующие задачи:

1. Анализ и обоснование перспективных направлений, обеспечивающих разработку методологии управления газовой выделением на выемочных участках при высокоинтенсивной обработке пологих пластов с учётом взаимовлияния геомеханических и аэрогазодинамических процессов.

2. Исследование и обоснование значений аэродинамических сопротивлений трения подземных горных выработок сечением свыше  $16 \text{ м}^2$ , закреплённых современными видами крепей.

3. Исследование аэродинамических особенностей тупиков, оставляемых при возведении перемычек для изоляции обработанных выемочных столбов и проветриваемых за счёт турбулентной диффузии.

4. Исследование закономерностей распределения в пространстве и времени параметров геомеханических процессов, протекающих в зоне обрушения, с целью определения аэродинамических характеристик обрушенной среды и интегрирования её модели в модель шахтной вентиляционной сети.

5. Исследование особенностей формирования газового коллектора, как свободного пространства в куполах зоны обрушения, на участках, примыкающих к очистному забою выше плоскости вынимаемого пласта угля.

6. Исследование и разработка методологии управления газовой выделением на выемочных участках при высокоинтенсивной обработке пологих угольных пластов очистными забоями длиной 150 м и более с учётом взаимодействия элементов системы «горные выработки – зона обрушения – дезинтегрированные породы – источники метановыделения».

**Методы исследований.** Комплексный подход к выполнению исследований заключается в использовании методов математической статистики, контрольных объёмов и конечных элементов, трёхмерного моделирования, анализа горно-геологических и горнотехнических условий обработки пологих пластов угольных шахт, ГИС-технологии. Кроме того, для решения поставленных задач применён системный анализ и обобщение результатов научных исследований, выполненных ранее другими исследователями, в том числе практических данных по замерам фильтрационных параметров зон обрушения. В рамках распараллеливания вычислительных задач при выполнении исследования собран кластер типа Beowulf, работающий под управлением операционной системы GNU/Linux.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. На дебит метана из зоны обрушения, как техногенно сформированного дезинтегрированного участка геомассива, в действующие выработки оказывают влияние: кривизна линий фильтрационных потоков, давление воздуха в вентиляционных струях, динамика параметров газового коллектора, проницаемость обрушенной среды, которые в дополнение к уже имею-

щимся факторам позволяют прогнозировать расположение локальных зон скоплений метана в пределах выемочного участка.

2. Значения коэффициентов аэродинамического сопротивления трения  $\alpha$  горных выработок, закреплённых анкерной и рамной металлической (арочной) крепями, варьируются по квадратичной зависимости от площади поперечного сечения и шага установки элементов крепи. Для рамной крепи при неизменном сечении максимальные значения коэффициентов  $\alpha$  соответствуют шагу установки элементов, равному 1,0-1,2 м. Для условий комбайнового способа проведения выработок и анкерного их крепления средняя высота выступов шероховатости стенок составляет 107 мм.

3. Длина проветриваемого за счёт турбулентной диффузии участка тупика, который образован между перемычкой и действующей сквозной горной выработкой, определяется размерами первого пространственного вихря, диаметр которого составляет от 4,9 до 12,4 м в зависимости от ширины и высоты данного тупика. При этом скорость движения воздуха в данном вихре, соответствующая минимально допустимой и равная 0,15 м/с, поддерживается при скорости потока в смежной сквозной выработке не менее 1 м/с.

4. Проницаемость  $k_{пр.д}$  техногенно сформированного участка дезинтегрированного геомассива при исходной пористости пород от 1,0 до 10,0 % в зоне обрушения составляет: при  $k_{р.мах} = 1,8 - k_{пр.д}$  от 8,8-22,2 Д до 1020-1140 Д; при  $k_{р.мах} = 2,0 - k_{пр.д}$  от 15,6-33,5 Д до 1310-1430 Д; при  $k_{р.мах} = 2,1 - k_{пр.д}$  от 19,9-40,2 Д до 1430-1550 Д. Значения проницаемости  $k_{пр.д}$  в куполах зоны обрушения составляют от 0,05-1,62 Д до 2,15-8,19 Д, а на участке зоны трещин и разломов, примыкающем к зоне обрушения, от 0,01-1,14 Д до 0,39-3,38 Д.

5. Участок зоны обрушения, примыкающий к очистному забою, следует делить на три области: закрепное пространство, газовый коллектор, обрушенные и дезинтегрированные породы, на форму и размеры которых оказывают влияние: протяжённость призабойного пространства  $l_{оз}$ , мощность пласта, принятая к отработке  $m_b$ , структура, крепость  $f_{сл}$ , трещиноватость  $l_{тр}$  и мощность  $m_{сл}$  слоёв кровли. В зависимости от указанных параметров объём газового коллектора может составлять от 3 до 48 % объёма очистного забоя. В установившемся режиме посадки основной кровли объёмы газового коллектора и закрепного пространства изменяются взаимосвязано и ступенеобразно. При этом данные изменения являются противоположно направленными: при увеличении объёма  $\Delta V_{г.к}$  (за счёт отделения блоков зависшей консоли и их падения) происходит уменьшение объёма  $\Delta V_{з.пр}$  и наоборот.

6. Методология, основанная на совместном учёте элементов системы «горные выработки – зона обрушения – дезинтегрированные породы – источники метановыделения», позволяет оценивать геомеханические и аэрогазодинамические параметры процессов формирования купола обрушения и применять адаптируемые к существующим условиям системы управления газовой выделением, обеспечивающие высокий уровень безопасности горных работ и ритмичность добычи угля в очистном забое.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Обоснована необходимость совместного учёта элементов системы «горные выработки – зона обрушения – дезинтегрированные породы – источники метановыделения» с целью выполнения прогноза дебитов метана с учётом влияния газового коллектора, формирующегося в куполе зоны обрушения.

2. Впервые получены коэффициенты  $\alpha$  горных выработок, закреплённых анкерной и рамной арочной крепями, отличающиеся их ранжированием для рамной крепи по номеру спецпрофиля (от СВП-17 до СВП-33), шагу установки элементов крепления (от 0,3 до 1,2 м) и площади поперечного сечения (до 37,7 м<sup>2</sup>), а для анкерной крепи – по площади поперечного сечения (до 36,0 м<sup>2</sup>) горной выработки.

3. Научно обоснованы и впервые получены длины участков тупиков между перемычкой и сквозной выработкой, проветриваемых за счёт турбулентной диффузии, при этом установлены зависимости скорости движения воздуха в первом пространственном вихре от скорости потока в сквозной горной выработке.

4. Предложена физическая и основанная на ней математическая модель, описывающие последовательность геомеханических процессов, происходящих при формировании выработанного пространства и зоны обрушения в целом: посадка кровли, дезинтегрирование и фрагментирование пород на блоки; разрыхление и уплотнение при дальнейшей активной стадии процессов сдвижения, отличающиеся от ранее предлагаемых учётом влияния следующих параметров:  $m_b$ , м;  $h_{обр}$ , м; коэффициенты  $k_{пр}$ ,  $M^2$ ,  $l_{ш}$ , м; коэффициенты  $k_r$ , доли ед.,  $k_{упл}$ , доли ед.,  $k_{пс}$ , доли ед.;  $T_{пр}$ ,  $T_{пад}$  и  $T_{вос}$ , сут;  $l_{тр}$ , м;  $m_{обр.сл}$ , м; шаги  $l_{о.к}$ , м, и  $l_{н.к}$ , м.

5. Разработана методическая основа оценки аэродинамических параметров закрепного пространства и газового коллектора, отличающаяся учётом таких параметров, как неравномерность нагрузки на очистной забой, вынимаемая мощность пласта, длина очистного забоя, структурные особенности кровли.

6. Обоснованы направления адаптации систем управления газовыделением при комбинации протекающих процессов, отличающиеся возможностью выполнения прогноза параметров процесса формирования газового коллектора.

**Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается:

- адекватностью применяемого математического аппарата;
- использованием представительного объёма данных натуральных замеров, выполненных в ходе воздушно-депресссионных съёмов, систем аэрогазового контроля, датчиков давления в гидросистеме секций механизированной крепи, а также скорости воздуха в тупиках между перемышкой и сквозной горной выработкой, проветриваемых за счёт турбулентной диффузии;
- использованием ранее полученных практических данных по замерам фильтрационных параметров зон обрушения, их обработкой и обобщением в соответствии с задачами, поставленными в диссертации;
- использованием фактических горно-геологических и горнотехнических данных выемочных участков угольных шахт для адаптации моделей к задачам исследования;
- достаточной сходимостью полученных результатов с известными теоретическими и практическими представлениями о геомеханических и аэрогазодинамических процессах при отработке выемочных столбов очистными забоями, оборудованными механизированными комплексами, на пологих пластах угольных шахт.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Предложен метод моделирования единого газодинамического комплекса выемочного участка посредством интегрирования модели зоны обрушения в модель шахтной вентиляционной сети. Он основан на использовании разработанных физической и математической моделей процессов, происходящих при формировании зоны обрушения в ходе сдвижения геомассива и образовании пустот в приконтурных частях.

2. Создан программный пакет «Аэродинамика», позволяющий на основе расчётов прогнозировать трёхмерное распределение фильтрационных параметров дезинтегрированной среды зоны обрушения с учётом протекающих геомеханических процессов при сдвижении пород (авторы: *Ю.М. Говорухин*, С.С. Кубрин).

3. Разработана компьютерная программа «Вентиляция выемочных участков» (свидетельство о государственной регистрации № 2017614796), позволяющая выполнять расчёты дебитов метана из основных источников газового баланса выемочного участка, необходимых расходов воздуха на выемочный участок и параметров системы изолированного отвода метановоздушной смеси (авторы: *Ю.М. Говорухин*, А.Н. Домрачев, В.Г. Криволапов, О.Ю. Лукашов, Д.Ю. Палеев).

4. Разработана база данных «Информационная система по учёту аварий на объектах ведения горных работ» (свидетельство о государственной регистрации № 2021620303), позволяющая обрабатывать и хранить модели шахтных вентиляционных сетей опасных производственных объектов ведения подземных горных работ и в том числе вести учёт причин загазования выработок выемочных участков угольных шахт (авторы: Д.Ю. Палеев, *Ю.М. Говорухин*, А.Н. Домрачев, В.Г. Криволапов, И.М. Поздеева).

5. Проведена обработка практических данных воздушно-депресссионных съёмки и выполнены численные эксперименты, по результатам которых построены зависимости и сформированы табличные значения коэффициентов  $\alpha$  выработок сечением свыше  $16 \text{ м}^2$ , закреплённых рамной металлической (арочной) и анкерной креплениями.

6. Установлены параметры эффективного проветривания тупиков, оставляемых при изоляции отработанных выемочных столбов, за счёт турбулентной диффузии.

7. Предложен подход по адаптации систем управления газовой выделением при комбинации протекающих взаимосвязанных геомеханических и аэрогазодинамических процессов как в действующих выработках, так и в зоне обрушения, применение которого обеспечит безопасную и ритмичную высокоинтенсивную добычу угля.

**Реализация результатов работы.** Результаты научных исследований реализованы в:

- приказе Ростехнадзора от 08.11.2024 № 343 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические рекомендации по определению зон загазирования, параметров взрывоустойчивых перемычек и оценке полноты и достоверности компьютерных моделей вентиляционной сети шахты»;

- статьях «Давление горное» и «Дегазация угольных пластов» (т. 1), вошедших в энциклопедию «Гражданская защита» (энциклопедия в 4-х томах; под общей ред. В.А. Пучкова / МЧС России. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015. – URL: <https://www.mchs.gov.ru/deyatelnost/zashchita-naseleniya-i-territoriy-ot-chrezvychaynyh-situaciy/grazhdanskaya-zashchita>);

- сборнике нормативных правовых актов военизированных горноспасательных частей / Коллектив авторов. – М.: МЧС России, 2014. – 284 с. (Руководство по проведению воздушно-депресссионных съёмки объектов ведения горных работ, Руководство по проведению газовых съёмки угольных шахт);

- опытной эксплуатации программы «Аэродинамика» в ООО «ШахтЭксперт-Системы» при выполнении прикладных научно-исследовательских работ и разработке рекомендаций по повышению эффективности систем управления газовой выделением на выемочных участках шахт (Акт об использовании Программы).

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях, круглых столах и симпозиумах: «Нетрадиционные и интенсивные технологии разработки месторождений полезных ископаемых» (Новокузнецк, 2008), «Проблемы и перспективы добычи и переработки угля в Кузбассе» (Прокопьевск, 2010), «Научноёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» (Новокузнецк, 2010-2024), «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности» (Кемерово, 2011), Конференция по проблемам безопасности, посвящённая 75-летию создания ФГБУ ВНИИПО МЧС России (Москва, 2012), «Неделя горняка – 2015» (Москва, 2015), «Безопасность технологических процессов и производств» (Екатеринбург, 2021), «Актуальные вопросы деятельности военизированных горноспасательных частей» в рамках салона «Комплексная безопасность – 2021» (Москва, 2021), «Проблемы нелинейной геомеханики на больших глубинах» (Новосибирск, 2023), «Развитие производительных сил Кузбасса» в рамках секции «Промышленная безопасность» (Кемерово, 2023), «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (Москва, ИПКОН РАН, 2024), «Наука о данных, геоинформатика и системный анализ в изучении Земли» (Суздаль, 2024), «Проблемы техносферной безопасности. Ликвидация последствий чрезвычайных ситуаций» (Донецк, 2025).

В 2009 году в составе научного коллектива кафедры Геотехнологии Сибирского государственного индустриального университета получены диплом и бронзовая медаль за адаптацию программ «Вентиляция 1.0», «Ударная волна 1.0» ИУУ СО РАН для обеспечения учебного процесса по дисциплинам: «Вентиляция», «Аэрология горных предприятий», «Безопасность ведения горных работ», «Имитационное моделирование», «Геоинформационные системы».

В 2017 году за программу для ЭВМ «Вентиляция выемочных участков», представленную на конкурс «Лучший экспонат», проводимый в рамках Международной специализированной

выставки «Уголь России и Майнинг», «Охрана, безопасность труда и жизнедеятельности», «Недра России», получены диплом и серебряная медаль.

В 2021 году в рамках межведомственного опытно-исследовательского учения «Безопасная Арктика – 2021» выполнена апробация разработанной по результатам исследования методики оценки объёмов загазования горных выработок.

В 2024 году за разработку многорядной системы перфорированных преград для снижения избыточного давления во фронте ударной воздушной волны в составе авторского коллектива ФГКУ «Национальный горноспасательный центр» получен диплом Лауреата премии МЧС России за научные и технические разработки.

**Публикации.** Основные результаты исследований представлены в 47 опубликованных работах, из них 20 – в изданиях, рекомендуемых ВАК Министерства высшего образования и науки России. Получено 1 свидетельство Российской Федерации о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 свидетельство – базы данных. Подана заявка на 1 патент (от 16.06.2025 рег. № 2025116356). Издано 2 учебных пособия.

**Объём работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников из 347 наименований, содержит 317 страниц машинописного текста, 163 рисунка, 46 таблиц и 1 приложение.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В диссертации выполнены исследования и решена научная проблема управления газовыделением на выемочных участках шахт при высокоинтенсивной отработке пологих пластов.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определена степень научной работанности, сформулирована цель исследования, приведены объект исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены основные научные положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации полученных результатов.

**В первой главе** приведены результаты аналитического исследования состояния системы прогноза геомеханических и аэрогазодинамических параметров выемочных участков, обоснованы актуальность и перспективные направления исследования.

**Во второй главе** выполнены исследования геомеханических и аэрогазодинамических процессов на выемочных участках, представлены результаты обработки экспериментальных данных, построена физическая модель и разработана математическая модель процессов обрушения пород кровли, их дезинтегрирования и уплотнения в ходе дальнейшего сдвижения геомассива.

**В третьей главе** приведены результаты исследования и выполнено научное обоснование значений аэродинамических сопротивлений трения  $\alpha$  подземных горных выработок сечением свыше 16 м<sup>2</sup>, закреплённых рамной металлической (арочной) и анкерной крепями.

**В четвёртой главе** приведены результаты исследования аэродинамических особенностей тупиков, оставляемых при возведении перемычек для изоляции отработанных выемочных столбов и проветриваемых за счёт турбулентной диффузии, определены размеры проветриваемых зон, получены зависимости скорости воздуха в первом пространственном вихре от скорости потока в сквозной подземной горной выработке.

**В пятой главе** выполнены исследования процессов обрушения пород кровли в выработанное пространство, их дезинтегрирования и уплотнения, определены значения проницаемости пород в зоне обрушения, обоснованы параметры закрепного пространства и газового коллектора.

**В шестой главе** предложен подход, учитывающий взаимодействующие геомеханические и аэрогазодинамические процессы, для адаптации систем управления газовыделением с учётом совместного влияния элементов системы «горные выработки – зона обрушения – дезинтегрированные породы – источники метановыделения».

**Заключение** содержит основные выводы по результатам выполненного исследования.

**В приложении** представлены скан-копии документов, подтверждающих реализацию результатов исследования и их апробацию.

На основе выполненного исследования обоснованы следующие научные положения, выносимые на защиту:

**Первое защищаемое научное положение:** на дебит метана из зоны обрушения, как техногенно сформированного дезинтегрированного участка геомассива, в действующие выработки оказывают влияние: кривизна линий фильтрационных потоков, давление воздуха в вентиляционных струях, динамика параметров газового коллектора, проницаемость обрушенной среды, которые в дополнение к уже имеющимся факторам позволяют прогнозировать расположение локальных зон скопления метана в пределах выемочного участка.

Для оценки влияния сформировавшегося в зоне обрушения газового коллектора на аэрогазодинамические процессы, протекающие в действующих горных выработках выемочного участка, проведены сбор, анализ и обобщение данных системы аэрогазового контроля угольных шахт. Используются показания следующих датчиков: концентрации метана на исходящей струе из очистного забоя; скорости воздуха во входящей на выемочный участок струе и исходящей из него; концентрации метана и скорости воздуха перед газоотсасывающей установкой. При обработке данных рассмотрены периоды времени, равные суткам, в течение которых выбраны максимальные значения дебита метана перед газоотсасывающей установкой (у камеры смешивания) и соответствующие им значения в исходящей струе из очистного забоя.

Выполнено сравнение фактических значений дебитов метана с прогнозом для условий выемочных участков 16-17 шахты «Абашевская» (рисунок 1 а) и 1-1-5-6 бис шахты «Осинниковская» (рисунок 1 б). На представленных графиках приведены: динамика изменения наибольших фактических дебитов метана у газоотсасывающей установки и релевантные им значения дебитов рудничного газа на исходящей струе из очистной выработки (1 и 3); динамика изменения расчётных дебитов метана в соответствии с нагрузкой на очистной забой в зону обрушения и из разрабатываемого пласта (очистная выработка), полученные с использованием нормативно-технических документов (2 и 4). Цветом выделены экстремумы фактической абсолютной метанообильности выработанного пространства и их соответствие нагрузке на очистной забой. Указано расхождение в процентах с прогнозом, а также отмечен максимальный дебит метана из зоны обрушения.

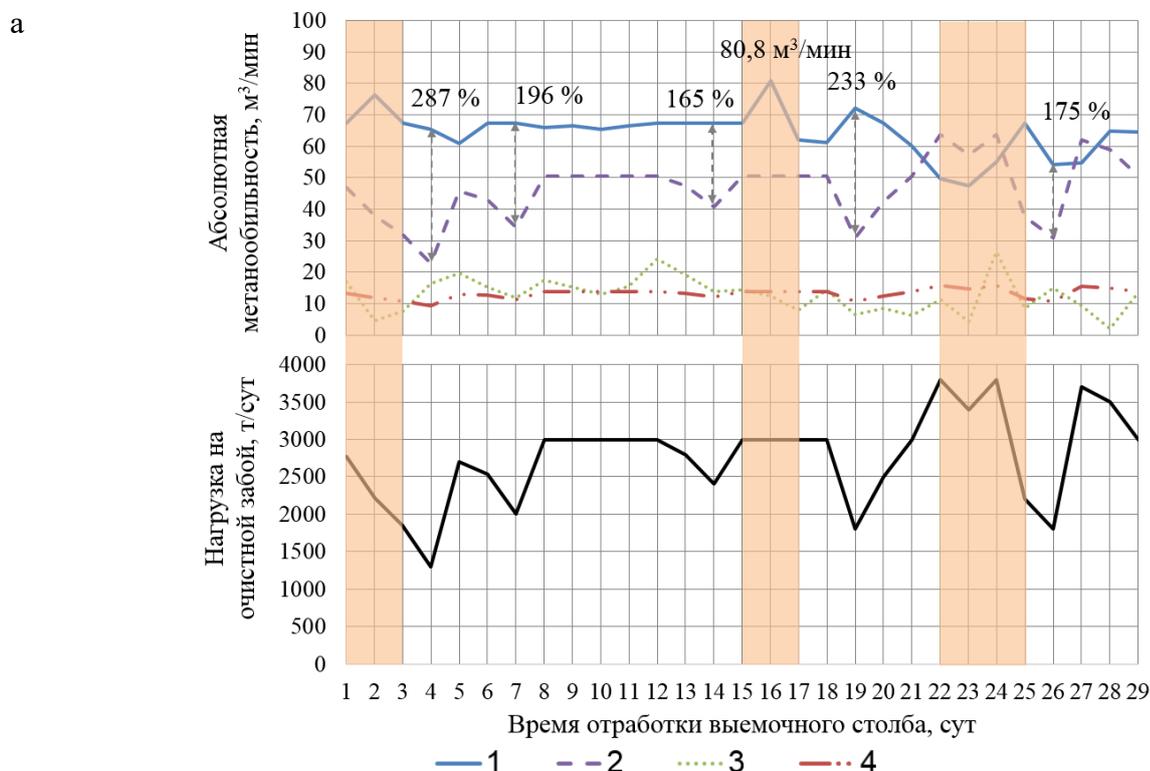


Рисунок 1 – Сравнение расчётной и фактической абсолютной метанообильности в соответствии с нагрузкой на очистной забой (начало)

Зона обрушения обладает инерционностью, т. е. максимальные дебиты метана не всегда соответствуют максимальным нагрузкам на очистной забой. При этом данная инерционность сглаживает динамику выделения метана, что выражается в том, что изменение нагрузки не при-

водит сразу же к аналогичному изменению дебита метана из зоны обрушения. В связи с этим отмечаются расхождения между фактическими данными и прогнозом, которые в среднем достигают 150-300 %. Максимальные дебиты метана из зоны обрушения достигают 80-130 м<sup>3</sup>/мин (рисунок 1), а в действующие выработки – 45 м<sup>3</sup>/мин и более (рисунок 2).

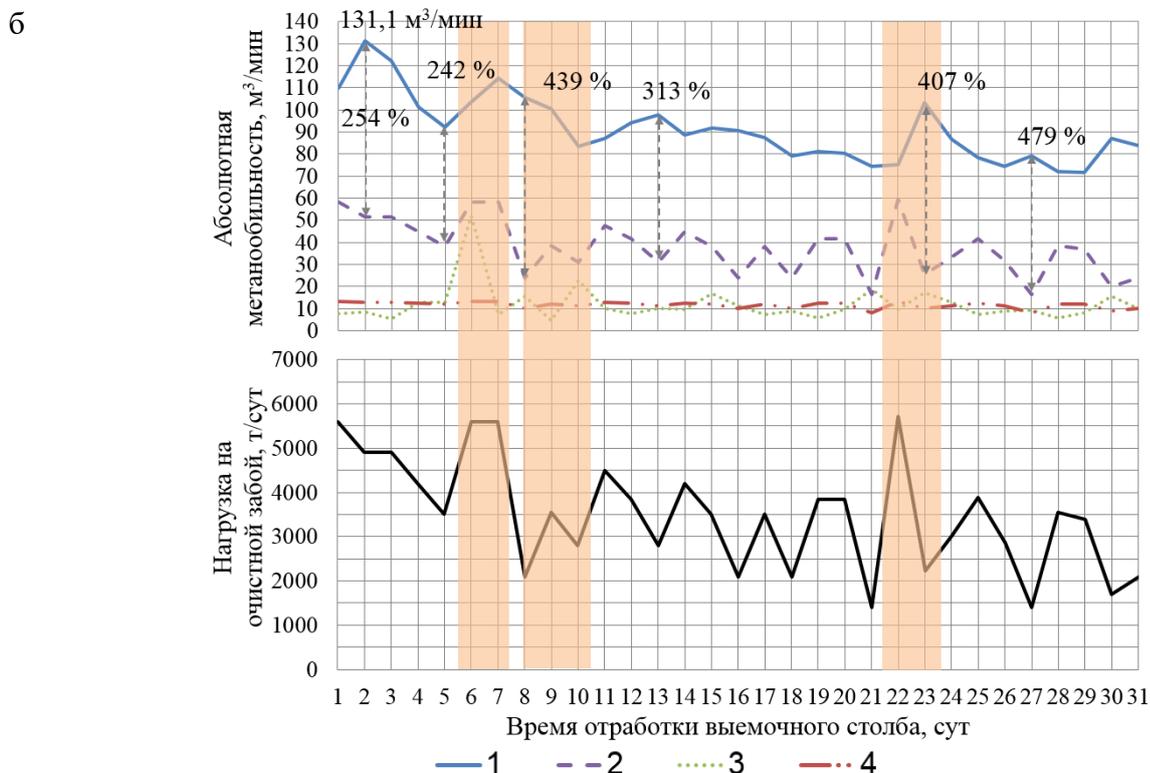


Рисунок 1 – Сравнение расчётной и фактической абсолютной метанообильности в соответствии с нагрузкой на очистной забой (окончание)

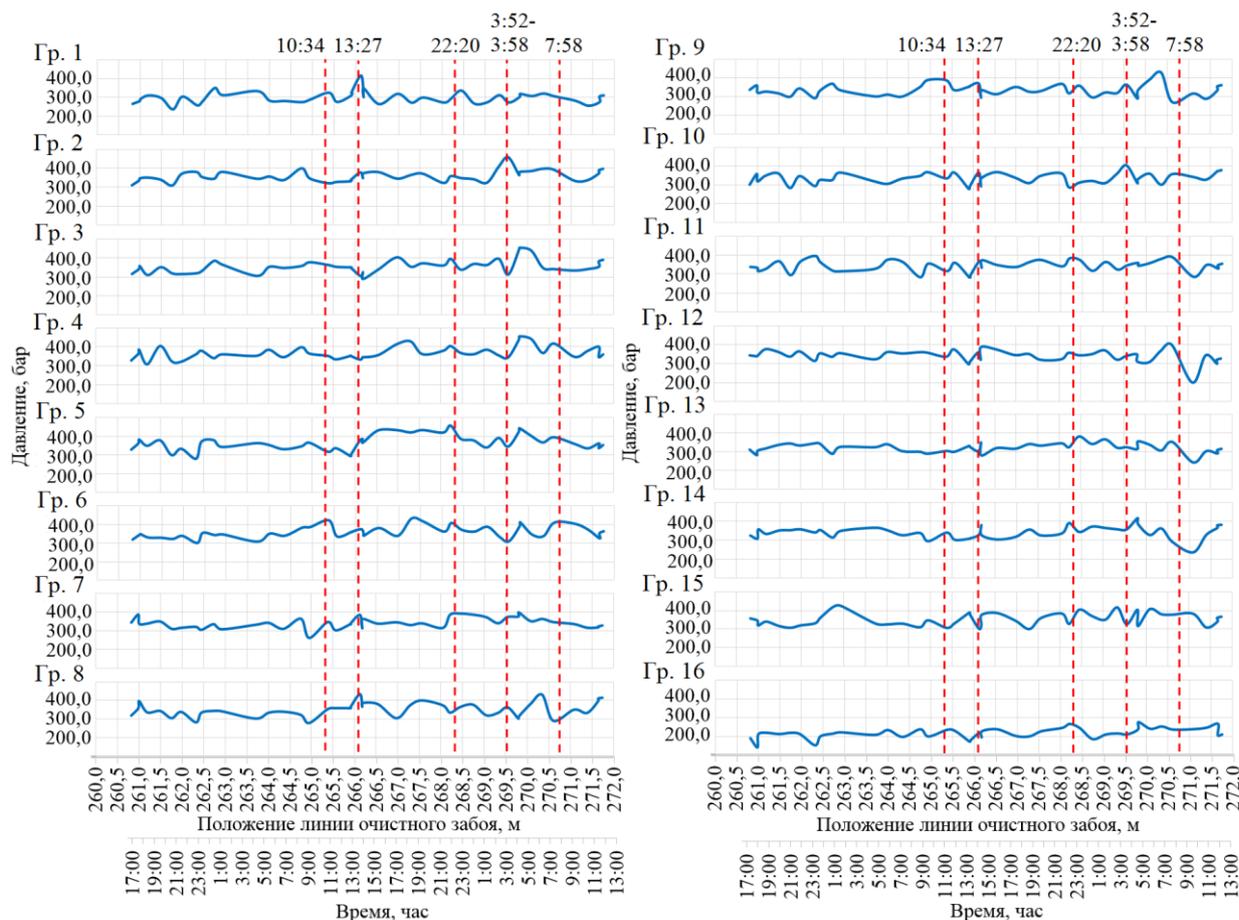


Рисунок 2 – Динамика концентрации метана при работе очистного забоя

Для оценки влияния геомеханических процессов, протекающих в зоне обрушения, на газовую обстановку в действующих выработках на примере выемочного участка 16-17 шахты «Абашевская» (Кузнецкий бассейн) выполнено обобщение практических данных по динамике давления в гидросистеме секций крепи механизированного комплекса, параметрам рудничного воздуха на исходящей струе из очистной выработки. Построены графики динамики концентрации метана на исходящей струе из очистной выработки и соответствующий ему график динамики среднего давления в гидросистеме механизированного комплекса (рисунки 2 и 3). Интер-

вал времени, на котором выполнено построение, соответствует двум суткам. Отход забоя по маркшейдерским пикетам составляет 11 м.

Серия графиков, представленных на рисунке 3 и демонстрирующих динамику давления в ассоциациях секций механизированной крепи, показывает релевантные и связанные между собой разнонаправленные колебания. Этот феномен обосновывается тем, что углевмещающий геомассив обладает развитой системой трещин и обрушение происходит блоками в результате расслоения и дезинтегрирования участков пород кровли по данным разрывам сплошности, а не единой консолью по длине очистной выработки. График на рисунке 2 иллюстрирует сопоставленные с обрушением осцилляции значений дебитов метана на исходящей струе. В результате обрушения блоков пород происходит рост концентрации метана, что обусловлено возникновением так называемого «воздушного удара» и вытеснением части газа, скопившегося в куполах зоны обрушения.

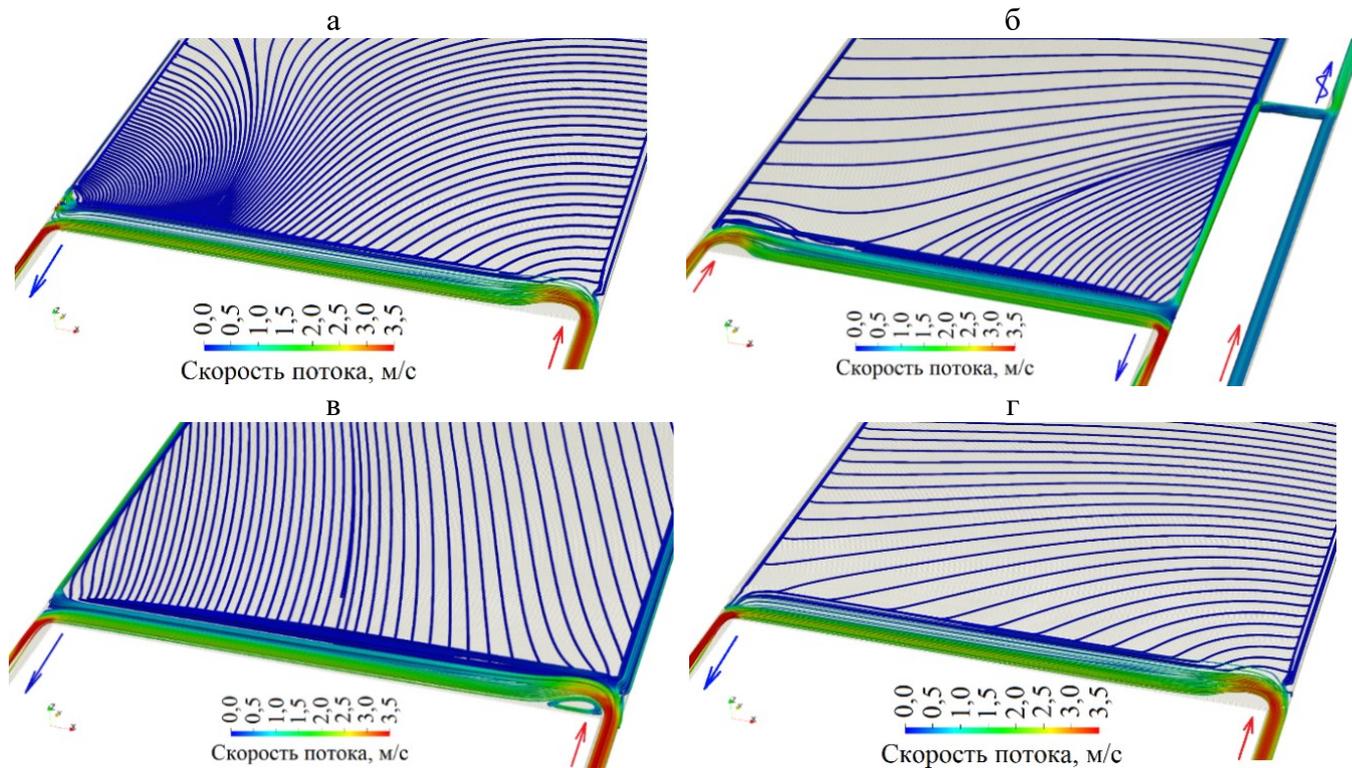


пунктирные линии – моменты возрастания концентрации метана на исходящей свыше 1 %  
 Рисунок 3 – Динамика среднего давления в гидросистеме групп секций механизированной крепи по линии движения очистного забоя

На рисунке 4 приведены результаты численного моделирования процессов воздухораспределения на выемочном участке с учётом выработанного пространства для условий применяемых схем проветривания с различными способами реализации изолированного отвода метано-воздушной смеси.

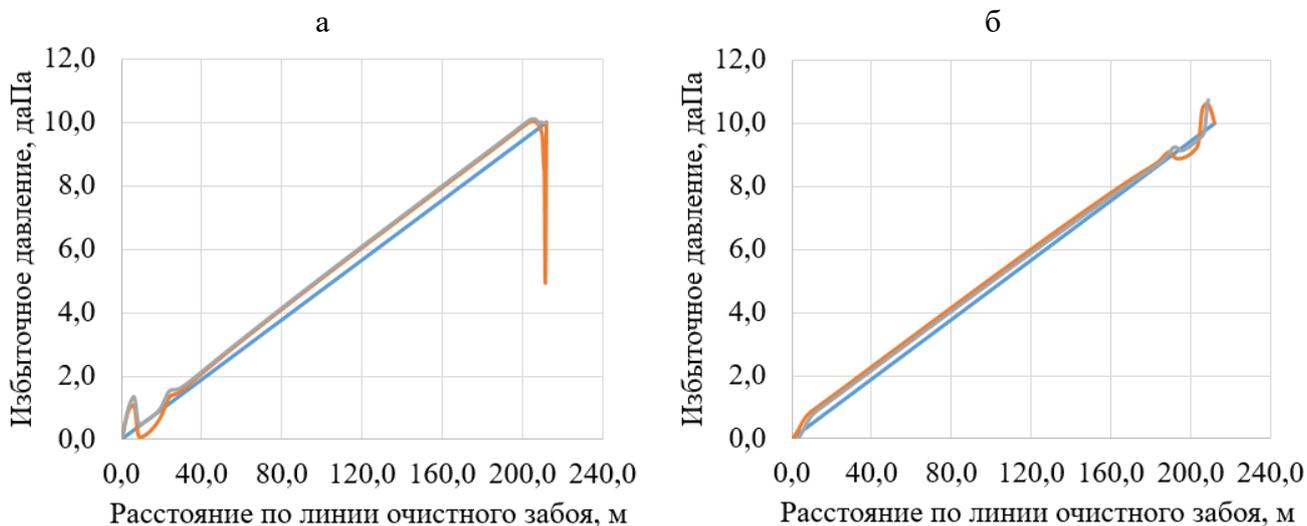
Выполнена оценка кривизны линий тока как меры, характеризующей направление фильтрационных потоков в зоне обрушения, для схем проветривания в соответствии с рисунком 4. Для рисунка 4 а: участок выработанного пространства со стороны входящей струи – диапазон значений радиуса кривизны составляет 2,7-558,8 м, участок у всасывающей трубы – 5,6-286,2 м. Для рисунка 4 б: участок со стороны входящей струи – 57,3-732,5 м, участок у отстающей сбойки – 239,2-2661,3 м. Для рисунка 4 в: радиус кривизны линий тока в выработанном пространстве составил диапазон значений 523,0-2115,3 м. Для рисунка 4 г: диапазон значений –

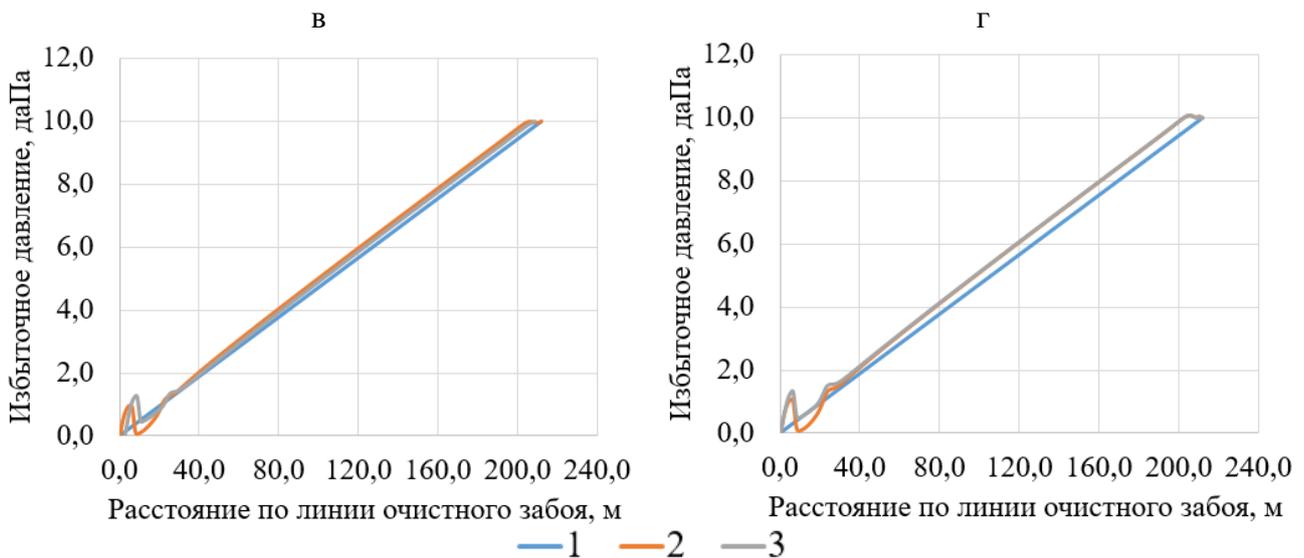
6,6-3011,4 м. Небольшие значения величин радиуса кривизны характеризуют траектории линий тока как сильно изогнутые. В связи с этим при формировании газового коллектора может происходить концентрированный вынос метана утечками воздуха из зоны обрушения.



а – по примыкающему к забою участку выработанного пространства (жёсткий трубопровод);  
 б – по ограниченному участку выработанного пространства (задняя сбойка);  
 в – по неограниченной зоне выработанного пространства; г – при отключенном газоотсосе  
 Рисунок 4 – Линии тока воздуха в очистном забое и примыкающему к нему участку выработанного пространства с различными способами реализации изолированного отвода

На рисунке 5 приведены графики изменения величин избыточного давления в очистном забое, закрепном пространстве и в куполе зоны обрушения для результатов расчёта воздухо-распределения на выемочном участке (рисунком 4). Как видно из графиков, в зоне обрушения формируются застойные участки, непрветриваемые утечками воздуха, в которых возможно накопление метана. На некоторых участках куполов зоны обрушения избыточное давление воздуха падает и, соответственно, они активно проветриваются утечками воздуха.





а-г – соответственно, к схемам на рисунках 4 а – 4 г  
 Рисунок 5 – Изменение избыточного давления по (1) длине очистного забоя,  
 (2) закрепного пространства и в (3) куполе зоны обрушения

В целях обеспечения нормативного уровня промышленной безопасности и ритмичной работы очистного оборудования при высокоинтенсивной отработке выемочных столбов на пологих пластах необходимо разрабатывать эффективные системы управления метановыделением при совместном учёте элементов системы «горные выработки – зона обрушения – дезинтегрированные породы – источники метановыделения».

Первая **научная новизна** исследования состоит в следующем: обоснована необходимость совместного учёта элементов системы «горные выработки – зона обрушения – дезинтегрированные породы – источники метановыделения» с целью выполнения прогноза дебитов метана с учётом влияния газового коллектора, формирующегося в куполе зоны обрушения.

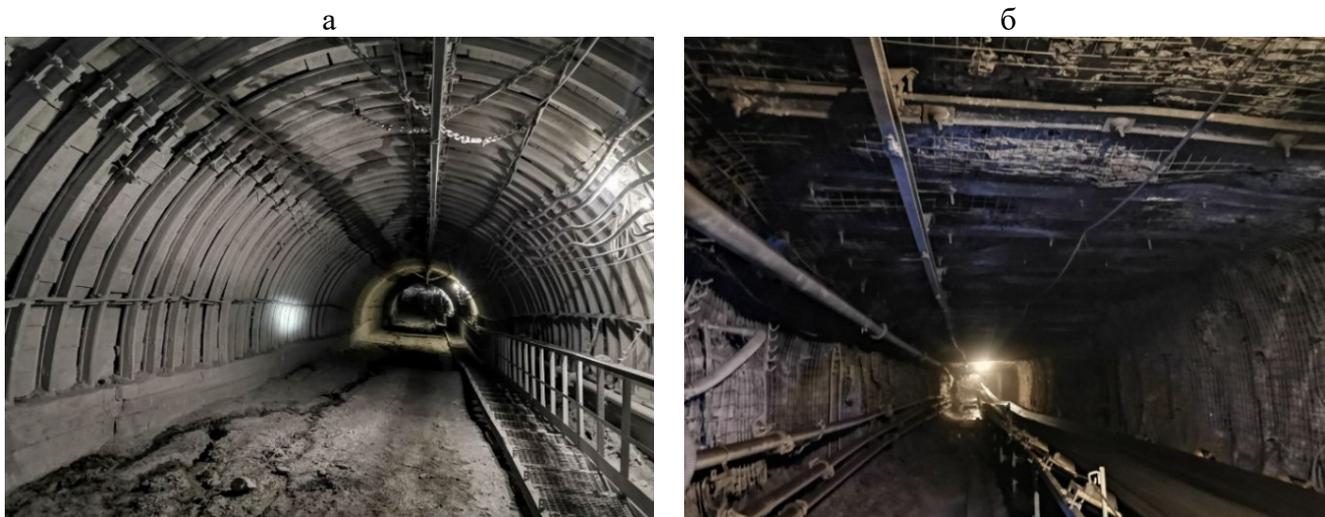
**Второе защищаемое научное положение:** значения коэффициентов аэродинамического сопротивления трения  $\alpha$  горных выработок, закреплённых анкерной и рамной металлической (арочной) крепями, варьируются по квадратичной зависимости от площади поперечного сечения и шага установки элементов крепи. Для рамной крепи при неизменном сечении максимальные значения коэффициентов  $\alpha$  соответствуют шагу установки элементов, равному 1,0-1,2 м. Для условий комбайнового способа проведения выработок и анкерного их крепления средняя высота выступов шероховатости стенок составляет 107 мм.

Для целей моделирования газодинамических процессов на выемочном участке и решения задач, связанных с разработкой эффективных систем управления газовой выделением, необходимы данные по значениям аэродинамических сопротивлений оконтуривающих выработок больших поперечных сечений (свыше 16 м<sup>2</sup>) для современных видов крепей. На рисунке 6 приведены фотографии горных выработок шахт Кузнецкого бассейна, закреплённых рамной металлической (арочной) и анкерной крепями.

Для получения фактических значений коэффициентов  $\alpha$  выполнены сбор, анализ и обобщение практических данных, полученных по результатам воздушно-депресссионных съёмов, выполненных ВГСЧ МЧС России на 54 шахтах, ведущих отработку пластов в условиях разных бассейнов страны. По результатам анализа данных практических замеров получено распределение ветвей по сечениям: 67719 ветвей характеризуются  $S$  более 10 м<sup>2</sup>, из них 45641 (67,4 %) – 10-16 м<sup>2</sup>, 16865 (24,9 %) – 16-21 м<sup>2</sup> и 5213 (7,7 %) более 21 м<sup>2</sup>, а для условий  $S > 16$  м<sup>2</sup> существует недостаток практических данных по их аэродинамическим параметрам (рисунок 7).

При проведении замеров в выработках сечением менее 10 м<sup>2</sup> возникают погрешности определения средней скорости потока из-за его возмущений замерщиком, а для сечений свыше 16 м<sup>2</sup> появляются трудности их обвода анемометром, а также значительные погрешности заме-

ров депрессии между станами из-за малости её значений на 100-метровых участках. Вследствие этого для результатов практических замеров рассмотрен диапазон сечений от 10 до 16 м<sup>2</sup>. Данные значения площади сечений использованы с целью оценки средней высоты выступов шероховатости  $k_b$  (формула Колбрука-Уайта). Её значение составило 107 мм. Значение этого параметра использовано для выполнения расчётов и определения коэффициентов  $\alpha$ , соответствующих условиям современных выработок с анкерной крепью и площадью сечения  $S = 10,0-36,0$  м<sup>2</sup> (при этом высота горной выработки –  $h = 2,0-6,0$  м, а её ширина –  $w = 5,0-6,0$  м, рисунок 8).



а – выработка шахты «Полосухинская» с рамной металлической (арочной) крепью КМП-А3;  
 б – выработка шахты «Увальная» с анкерной крепью  
 Рисунок 6 – Горные выработки угольных шахт Кузнецкого бассейна

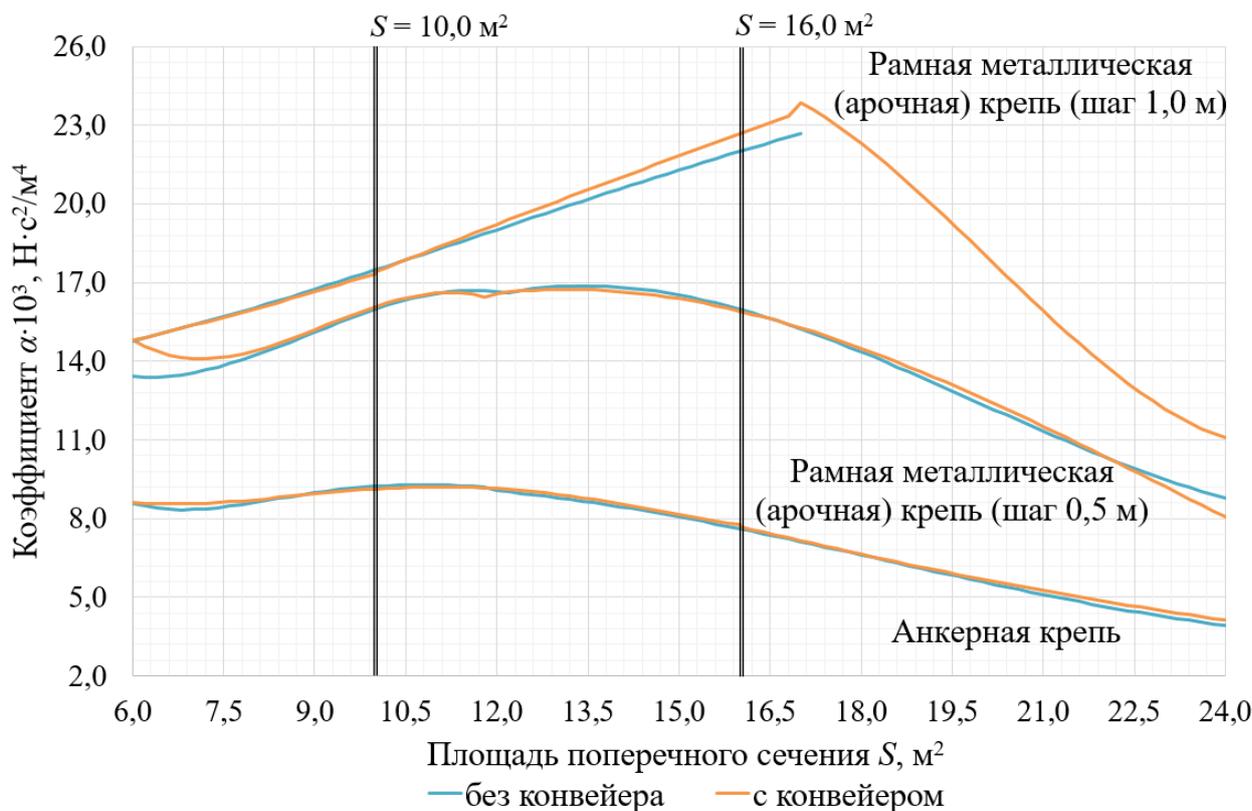


Рисунок 7 – График зависимостей  $\alpha(S)$  для разных способов крепления выработок

На основе гипотезы о полиномиальном виде определена аппроксимирующая зависимость коэффициента  $\alpha$  от сечения  $S$ , м<sup>2</sup>, горной выработки с анкерным способом её крепления  $\alpha \cdot 10^3 = 0,00363 \cdot S^2 - 0,2549 \cdot S + 11,58$ .

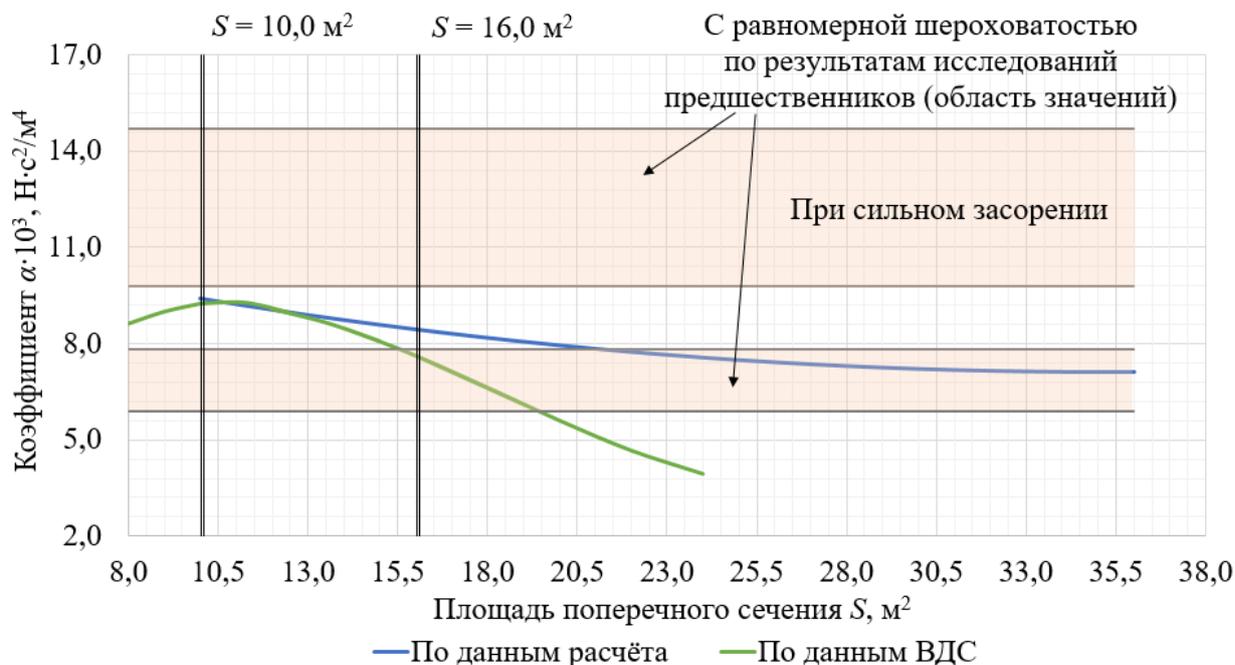
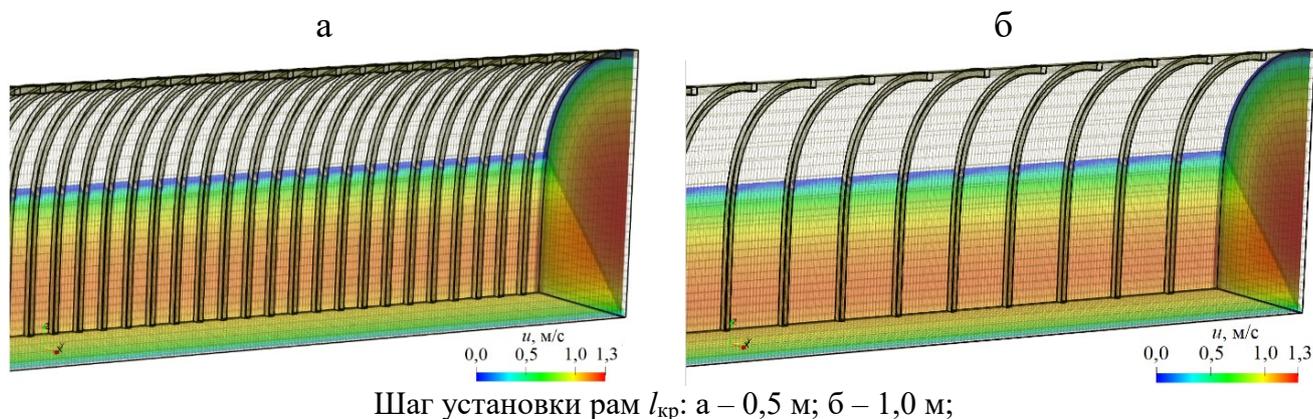


Рисунок 8 – График зависимостей  $\alpha(S)$  для выработок, закреплённых анкерной крепью, в сравнении с ранее известными значениями для незакреплённых пластовых выработок

Относительная погрешность полученных значений коэффициентов  $\alpha$  от данных практических замеров на интервале площадей сечений  $S$  от 10 до 16 м<sup>2</sup> составила до 10,0 %.

Изучение и определение значений коэффициентов  $\alpha$  выработок в условиях их крепления арками из спецпрофиля выполнено посредством использования численных методов. Созданы соответствующие модели горных выработок. Исследование проведено путём их продувания воздушным потоком. Рассмотрены и исследованы такие крепи, как КМП-А3, КМП-А4 и КМП-А5 с сечением в свету 8,2-37,7 м<sup>2</sup>. Интервал установки рам крепи изменяется от 0,3 до 1,2 м. В качестве допущения при моделировании принято, что спецпрофиль, из которого изготовлена крепь, обладает шероховатостью, полностью расположенной в ламинарном пограничном слое (гидравлически гладкая поверхность), а для межрамного пространства и почвы она аналогична стенкам выработки в условиях применения анкерной крепи.

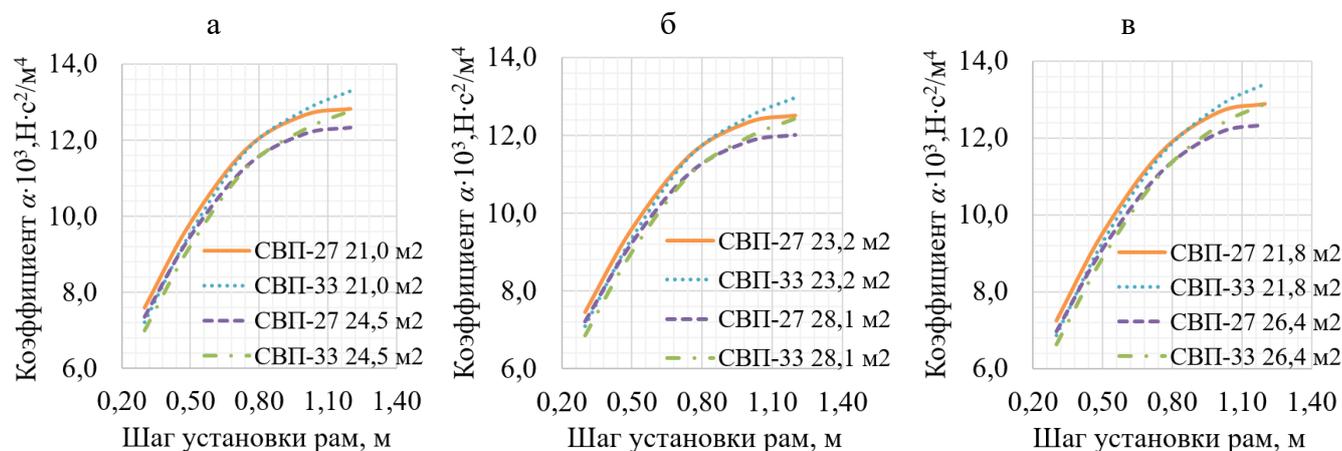
Всего создано и исследовано 235 моделей выработок, длина каждой из них составляет 300 м (рисунок 9). Для всего стека моделей числа Рейнольдса составили диапазон  $\lg Re = 5,30-5,63$  (полностью развитый турбулентный режим движения потока воздуха). На рисунке 10 приведены некоторые полученные зависимости коэффициента  $\alpha$  от шага установки рам.



Шаг установки рам  $l_{кр}$ : а – 0,5 м; б – 1,0 м;  
Рисунок 9 – Распределение скорости потока по сечению выработки, закреплённой крепью КМП-А3 (профиль СВП-33,  $S = 21,0$  м<sup>2</sup>)

Максимальные значения коэффициентов  $\alpha$  имеют место при установке элементов крепи с шагом 1,0-1,2 м. Это связано с тем, что для данных шагов поток воздуха, поджимаясь у рам

крепи и далее при его срыве, образует свободную струю и расширяется на большей длине участка выработки. Максимальное сопротивление получается в том случае, если свободная струя достигает стенок выработки перед повторным сжатием у следующей рамы, т. к. расходуется больше энергии потока.



а – для КМП-А3; в – для КМП-А4; д – для КМП-А5  
Рисунок 10 – Зависимости коэффициента  $\alpha$  от шага установки рам

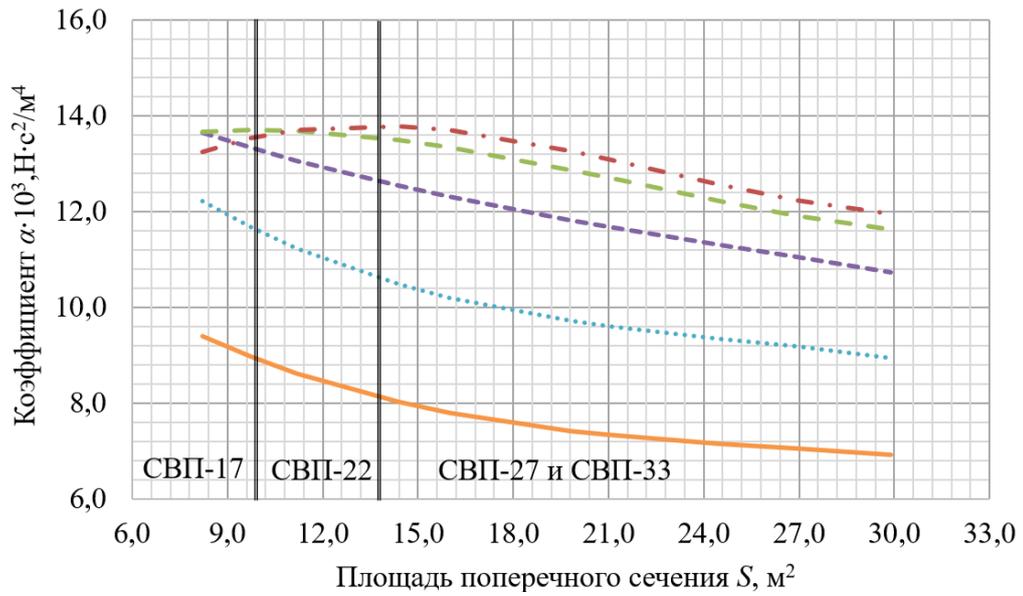
Определены значения коэффициентов  $\alpha$  для горных выработок с арочной крепью с учётом их ранжирования по номеру спецпрофиля. В таблице 1 и на рисунке 11 приведены соответствующие аппроксимирующие зависимости  $\alpha(S)$ , полученные исходя из гипотезы об их полиномиальном виде. Эти значения соотносятся со следующими условиями: прямолинейный участок горной выработки с арочной крепью; выработка чистая (не захламлена оборудованием, материалами и пр.); смещение рам относительно центральной оси выработки отсутствует; площадь поперечного сечения  $S$  от 8,2 до 37,7 м<sup>2</sup>; рамы крепи установлены равномерно с шагом  $l_{кр} = 0,3-1,2$  м.

Таблица 1 – Полученные зависимости  $\alpha(S)$  для выработок, закреплённых арочной крепью

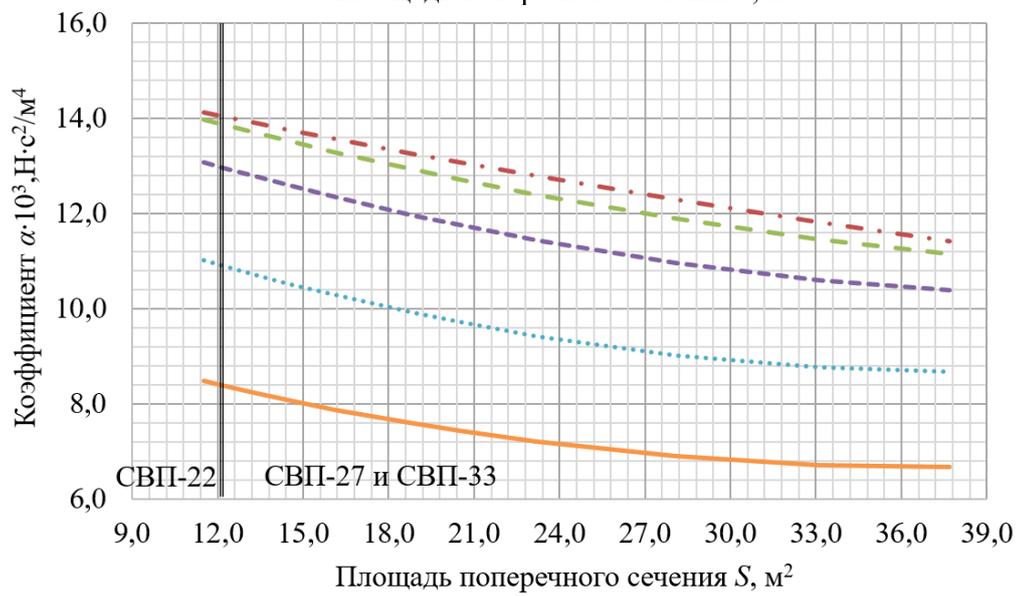
№ п/п	Тип крепи	Расстояние между рамами, м	Зависимость $\alpha(S)$
1	КМП-А3	0,30	$\alpha \cdot 10^3 = 0,0054 \cdot S^2 - 0,3147 \cdot S + 11,515$
		0,50	$\alpha \cdot 10^3 = 0,0062 \cdot S^2 - 0,3775 \cdot S + 14,752$
		0,75	$\alpha \cdot 10^3 = 0,0021 \cdot S^2 - 0,2127 \cdot S + 15,202$
		1,00	$\alpha \cdot 10^3 = -0,0023 \cdot S^2 - 0,0148 \cdot S + 14,075$
		1,20	$\alpha \cdot 10^3 = -0,0058 \cdot S^2 + 0,1425 \cdot S + 12,712$
2	КМП-А4	0,30	$\alpha \cdot 10^3 = 0,0028 \cdot S^2 - 0,2063 \cdot S + 10,478$
		0,50	$\alpha \cdot 10^3 = 0,0032 \cdot S^2 - 0,2471 \cdot S + 13,436$
		0,75	$\alpha \cdot 10^3 = 0,0026 \cdot S^2 - 0,2304 \cdot S + 15,387$
		1,00	$\alpha \cdot 10^3 = 0,0019 \cdot S^2 - 0,2013 \cdot S + 16,045$
		1,20	$\alpha \cdot 10^3 = 0,0008 \cdot S^2 - 0,1424 \cdot S + 15,66$
3	КМП-А5	0,30	$\alpha \cdot 10^3 = 0,0055 \cdot S^2 - 0,3242 \cdot S + 11,485$
		0,50	$\alpha \cdot 10^3 = 0,0051 \cdot S^2 - 0,3273 \cdot S + 14,028$
		0,75	$\alpha \cdot 10^3 = 0,0016 \cdot S^2 - 0,1787 \cdot S + 14,659$
		1,00	$\alpha \cdot 10^3 = -0,0039 \cdot S^2 + 0,0868 \cdot S + 12,714$
		1,20	$\alpha \cdot 10^3 = -0,0085 \cdot S^2 + 0,3171 \cdot S + 10,319$

Определено, что наибольшая сходимость с практическими значениями, полученными по результатам воздушно-депресссионных съёмов, наблюдается при коэффициенте аэродинамического старения выработки  $C_\alpha = 1,44$ . Относительная погрешность полученных значений от данных практических замеров на интервале площадей сечений  $S$  от 10 до 16 м<sup>2</sup> при шаге установке рам  $l_{кр} = 0,5$  м составила до 8,4 %, а при шаге  $l_{кр} = 1,0$  м – до 13,3 %.

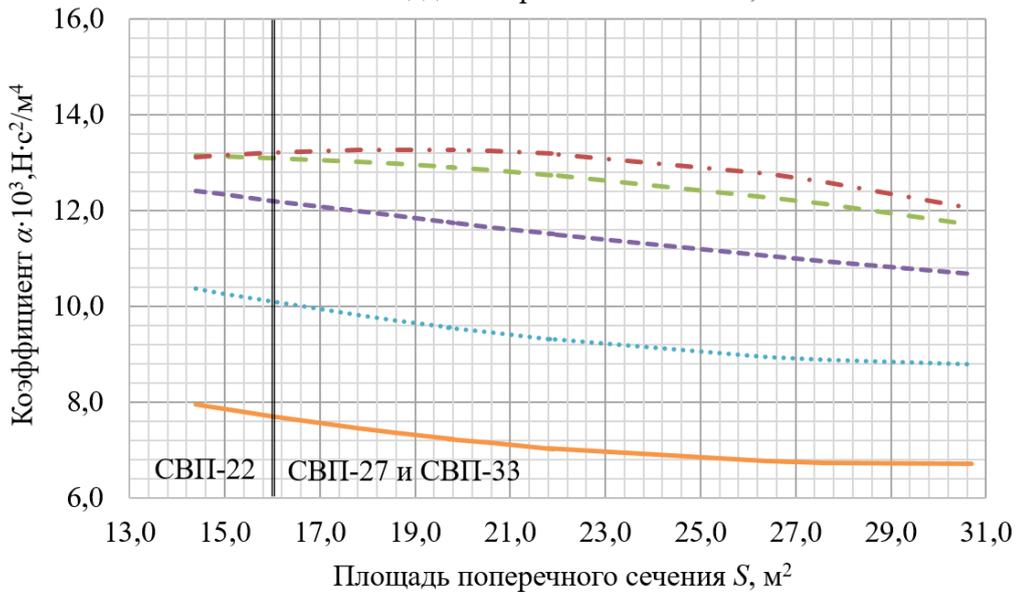
а



б



в



— 0,3 м    ..... 0,5 м    - - - 0,75 м    - - - 1,0 м    - . - 1,2 м

а – КМП-А3; б – КМП-А4; в – КМП-А5

Рисунок 11 – Графики зависимостей коэффициента  $\alpha(S)$  для выработок, закреплённых рамной металлической (арочной) крепью

Вторая **научная новизна** исследования состоит в следующем: впервые получены коэффициенты  $\alpha$  горных выработок, закреплённых анкерной и рамной арочной крепями, отличающиеся их ранжированием для рамной крепи по номеру спецпрофиля (от СВП-17 до СВП-33), шагу установки элементов крепления (от 0,3 до 1,2 м) и площади поперечного сечения (до 37,7 м<sup>2</sup>), а для анкерной крепи – по площади поперечного сечения (до 36,0 м<sup>2</sup>) горной выработки.

**Третье защищаемое научное положение:** *длина проветриваемого за счёт турбулентной диффузии участка тупика, который образован между перемычкой и действующей сквозной горной выработкой, определяется размерами первого пространственного вихря, диаметр которого составляет от 4,9 до 12,4 м в зависимости от ширины и высоты данного тупика. При этом скорость движения воздуха в данном вихре, соответствующая минимально допустимой и равная 0,15 м/с, поддерживается при скорости потока в смежной сквозной выработке не менее 1 м/с.*

На рисунке 12 приведены фотографии тупиков, оставленных после возведении перемычек для изоляции отработанных выемочных столбов и проветриваемых за счёт турбулентной диффузии, на угольных шахтах Кузнецкого бассейна.



а – на шахте «Полосухинская»; б – на шахте «Увальная»

Рисунок 12 – Тупики, образованные в выработках после возведения перемычек

Выполнены экспериментальные исследования движения воздуха в тупиках, проветриваемых за счёт турбулентной диффузии, посредством замеров скорости потока воздуха в выработках шахты «Есаульская» (Кузнецкий бассейн). С использованием фактических геометрических размеров данных выработок проведено численное моделирование процессов проветривания тупиков за счёт турбулентной диффузии и сравнение полученных значений с фактическими. На рисунке 13 приведены линии тока пространственных вихревых структур в реальных тупиках, полученные по результатам численного моделирования (1 – направление движения воздуха в сквозной выработке): а – тупик 1: вентиляционный штрек 26-25 шириной 3,58 м, длиной 4,5 м (сопряжение с конвейерным бремсбергом 26-51 бис); б – тупик 2: сбойка шириной 5,62 м, длиной 6,0 м (сопряжение с путевым бремсбергом 26-51 «Север»); в – тупик 3: заезд на конвейерный штрек 26-23 шириной 2,97 м, длиной 6,0 м (сопряжение с путевым бремсбергом 26-51 «Юг»).

Выполнено сравнение полученных значений при моделировании и натурных замерах. Некоторые из графиков для одного из станов, в которых выполнялись замеры в рассматриваемых тупиках, приведены на рисунке 14.

Анализ результатов, полученных при численном моделировании и шахтных замерах, позволил сделать вывод, что по количественным и качественным параметрам принятая численная модель адекватна полученным фактическим данным. Это подтверждается значениями отно-

сительной погрешности скорости воздуха при численном моделировании в сравнении данными замеров, которая не превысила 13,3 %.

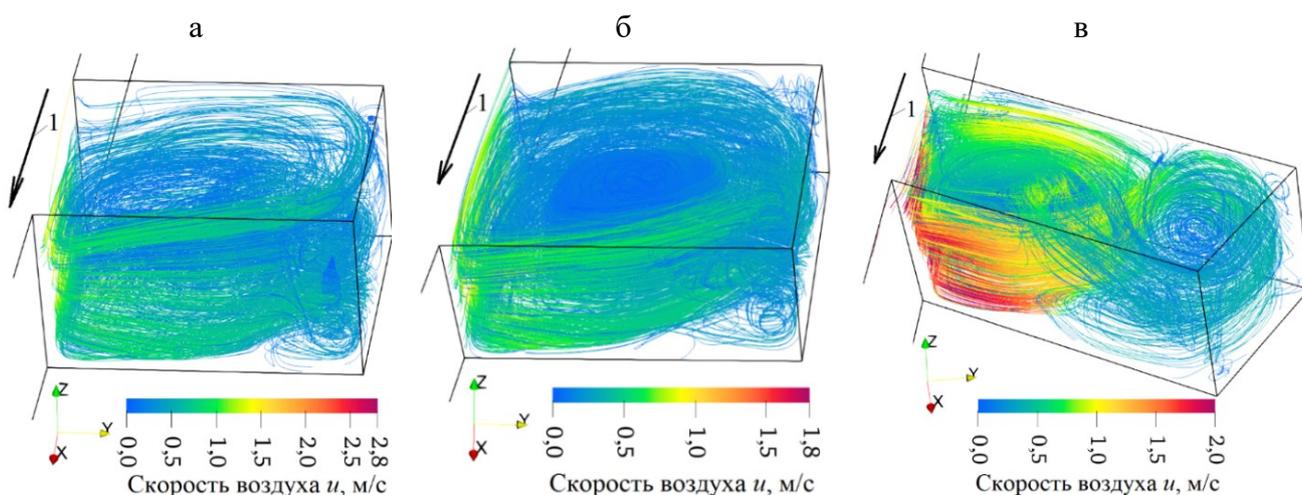
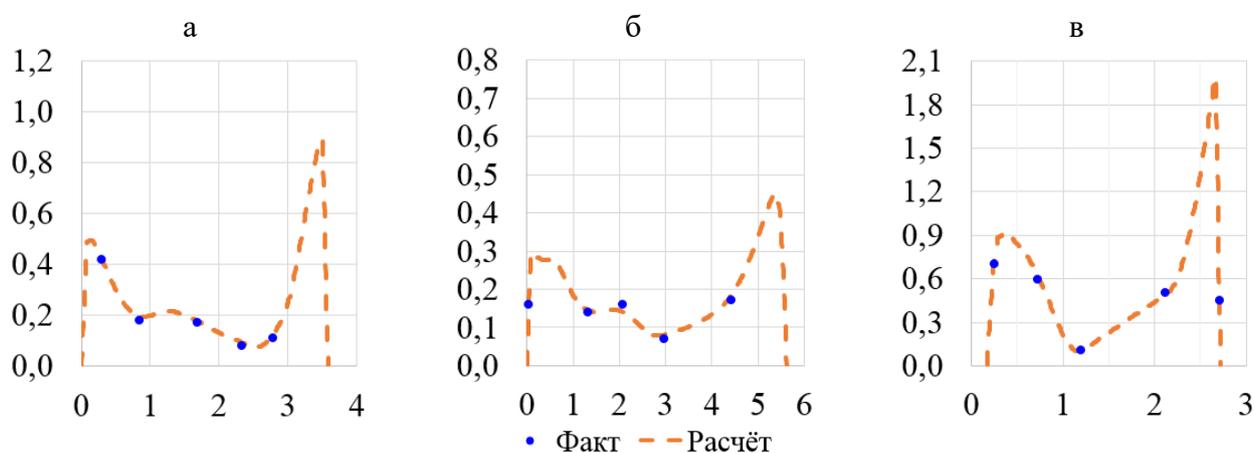


Рисунок 13 – Линии тока вихревых структур в тупиках по результатам моделирования



ось абсцисс ( $x$ ) – ширина тупика, м; ось ординат ( $y$ ) – скорость воздуха, м/с  
а-в – для тупиков, показанных на рисунке 13 а – 13 в, соответственно

Рисунок 14 – Изменение скорости воздуха по ширине тупика в середине сечения

Для исследования аэродинамических параметров тупиков, проветриваемых за счёт турбулентной диффузии, выполнено численное моделирование процессов движения воздуха в них. Матрица начальных условий включает следующие параметры тупика: высота  $h_T$  – от 2,0 до 3,0 м; ширина  $w_T$  – от 3,0 до 6,0 м; скорость потока воздуха в сквозной подземной горной выработке  $u$  – от 0,15 до 6,0 м/с. Всего создано и исследовано 90 моделей. По результатам выполнена оценка размеров первого пространственного вихря, проветривающего тупик, и скорости воздуха в нём в зависимости от скорости воздуха в подготовительной горной выработке. Рассматриваемый диапазон чисел Рейнольдса  $\lg Re$  – 4,49-6,21 (полностью развитый турбулентный поток).

На рисунке 15 приведено распределение скоростей воздуха в тупике (сечение  $S = 15,0 \text{ м}^2$ , высота  $h_T = 2,5$  м, ширина  $w_T = 6,0$  м) для различных скоростей потока в сквозной выработке. Используются следующие обозначения: чёрные вертикальные линии – границы вихря, красная горизонтальная, пунктирная линия – минимальная допустимая скорость воздуха. На рисунке 16 приведены линии тока в тупике ( $h_T = 2,5$  м и  $w_T = 6,0$  м) при средней скорости воздуха в сквозной выработке  $u = 6$  м/с.

Для всех численных моделей выполнено сравнение коэффициента  $\alpha$  подготовительной сквозной выработки с аналитическим решением по формуле Колбрука-Уайта. Максимальное расхождение не превысило 11,4 %.

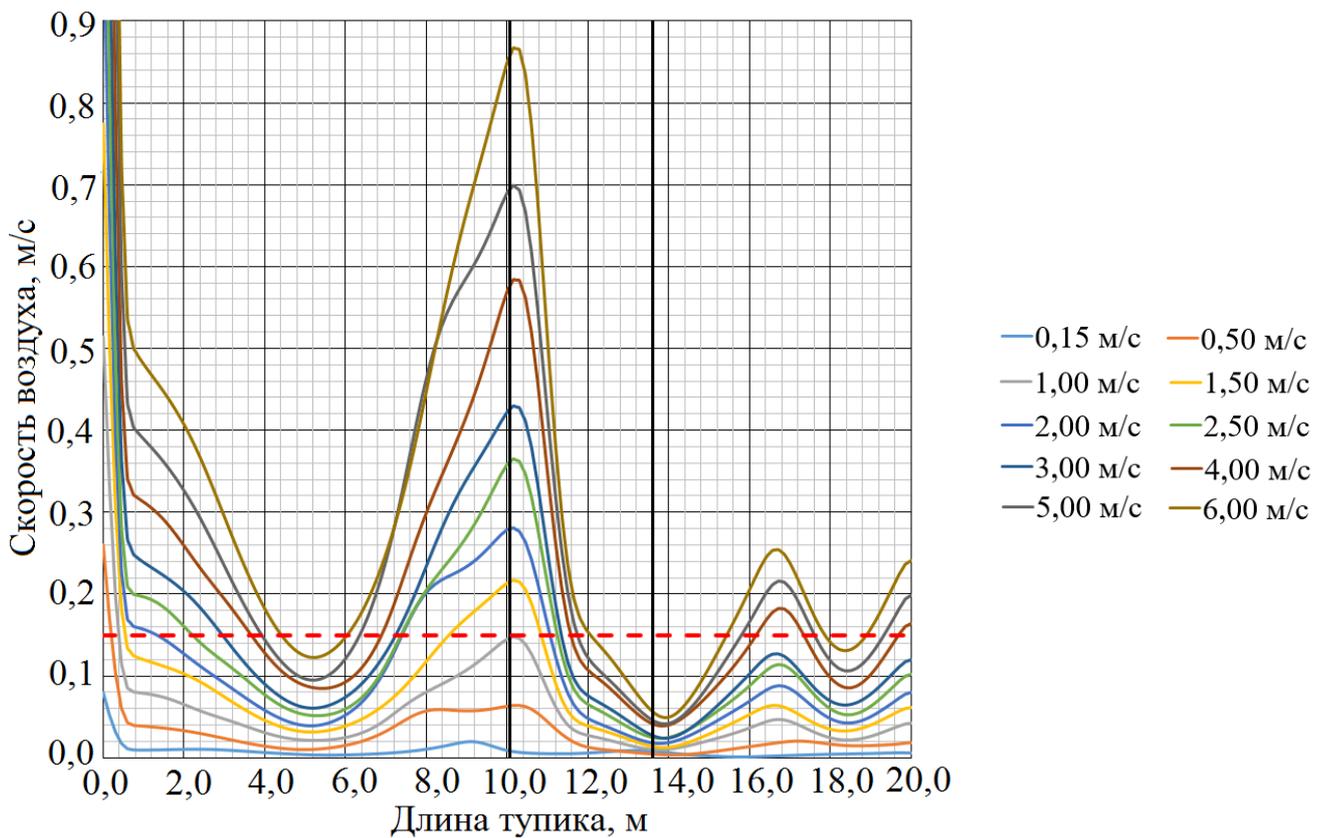
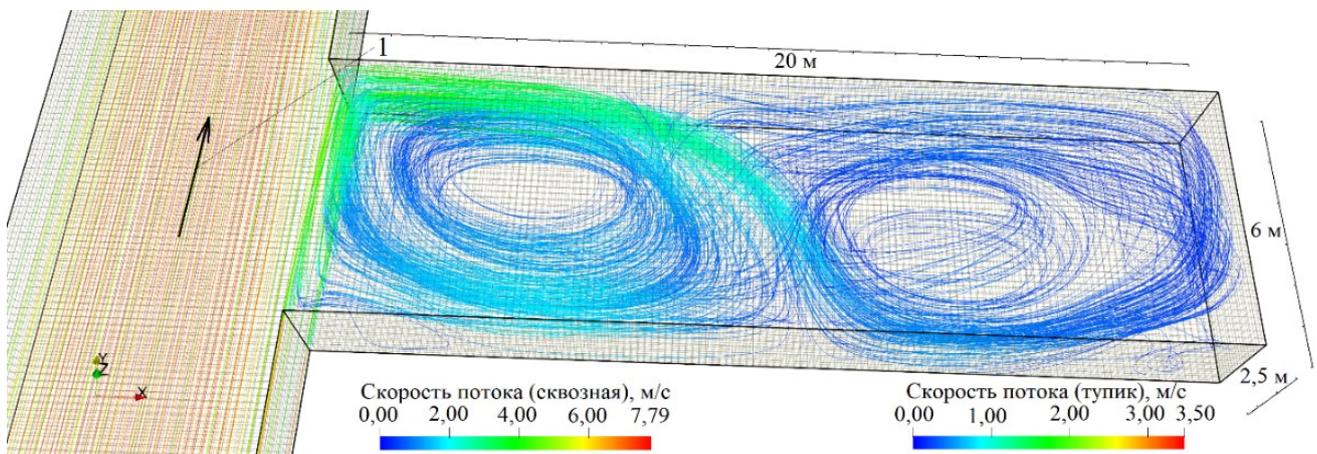


Рисунок 15 – Диаграмма распределения скорости течений в пространственных вихрях, проветривающих тупик  $S = 15,0 \text{ м}^2$ ,  $h_T = 2,5 \text{ м}$ ,  $w_T = 6,0 \text{ м}$



1 – направление движение воздуха в сквозной выработке

Рисунок 16 – Линии тока вихревых пространственных структур в тупике

На рисунке 17 приведены полученные зависимости протяжённости проветриваемой зоны выработки от её ширины и высоты. Длина проветриваемого участка тупиковой выработки возрастает с увеличением её высоты и ширины. Это связано с тем, что поток воздуха, проходящего мимо тупика по сквозной выработке, расширяется на большей длине сопряжения, и в тупик в итоге заходит плоская свободная струя большего объёма с большей кинетической энергией. Установлено, что длина участка проветриваемой за счёт турбулентной диффузии тупиковой горной выработки определяется размерами первого пространственного вихря, диаметр которого составляет от 4,9 до 12,4 м. Для обеспечения в первом пространственном вихре скорости воздуха, соответствующей минимально допустимой по действующим федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности и равной 0,15 м/с, скорость течения струи в сквозной выработке должна быть не менее 1 м/с.

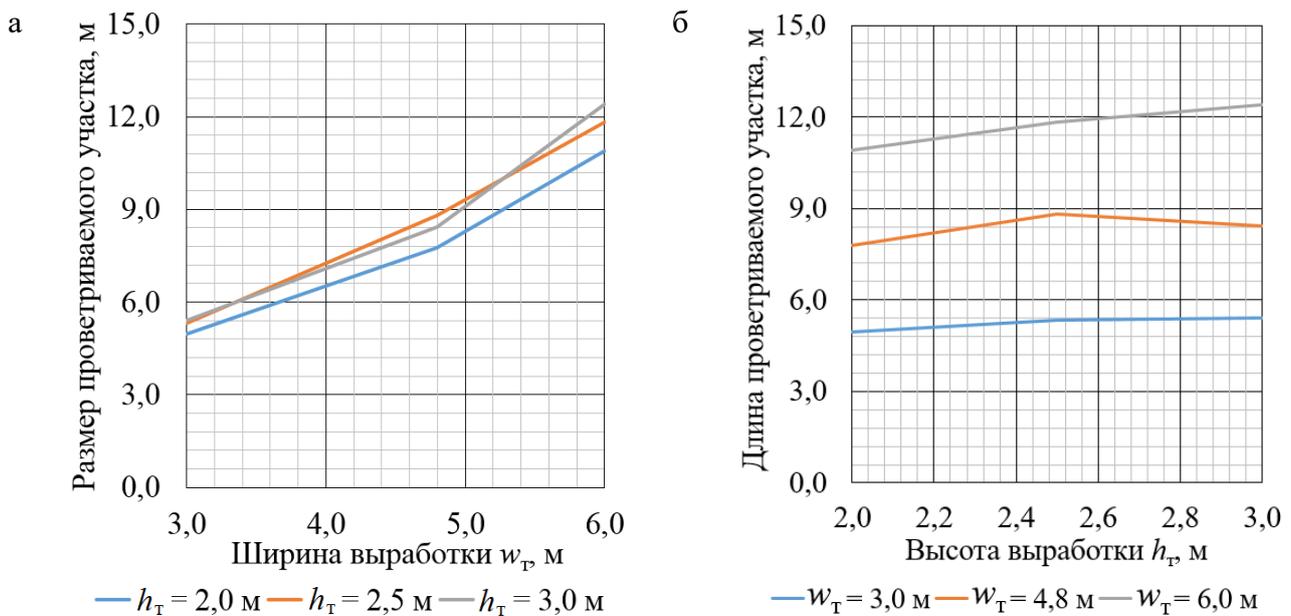
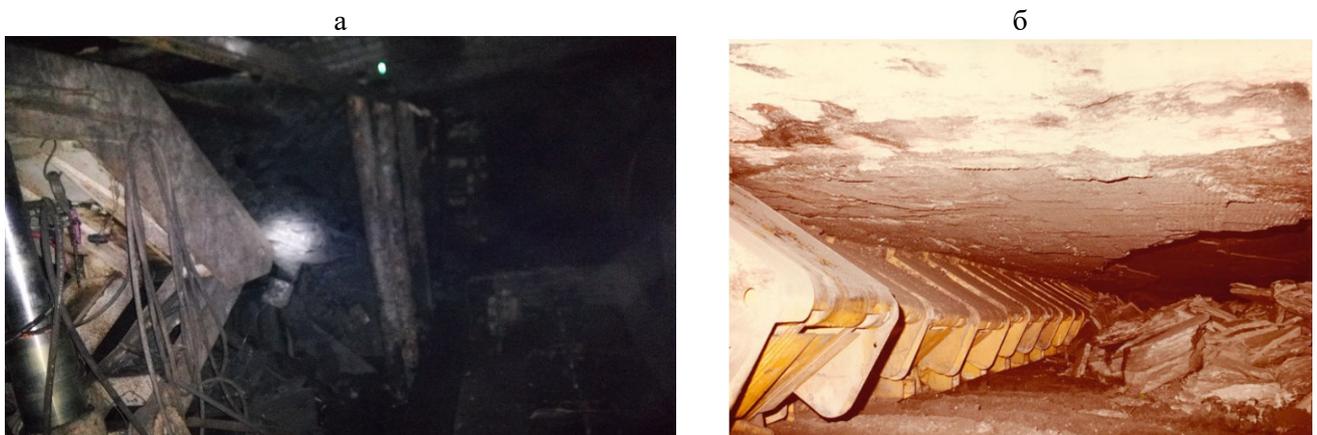


Рисунок 17 – Зависимость протяжённости проветриваемого участка тупика от его ширины и высоты за счёт турбулентной диффузии

Третья **научная новизна** исследования состоит в следующем: научно обоснованы и впервые получены длины участков тупиков между перемычкой и сквозной выработкой, проветриваемых за счёт турбулентной диффузии, при этом установлены зависимости скорости движения воздуха в первом пространственном вихре от скорости потока в сквозной горной выработке.

**Четвёртое защищаемое научное положение:** *проницаемость  $k_{пр,д}$  техногенно сформированного участка дезинтегрированного геомассива при исходной пористости пород от 1,0 до 10,0 % в зоне обрушения составляет: при  $k_{р,мах} = 1,8$  –  $k_{пр,д}$  от 8,8-22,2 Д до 1020-1140 Д; при  $k_{р,мах} = 2,0$  –  $k_{пр,д}$  от 15,6-33,5 Д до 1310-1430 Д; при  $k_{р,мах} = 2,1$  –  $k_{пр,д}$  от 19,9-40,2 Д до 1430-1550 Д. Значения проницаемости  $k_{пр,д}$  в куполах зоны обрушения составляют от 0,05-1,62 Д до 2,15-8,19 Д, а на участке зоны трещин и разломов, примыкающем к зоне обрушения, от 0,01-1,14 Д до 0,39-3,38 Д.*

На рисунке 18 приведены фотографии формирующейся зоны обрушения при отработке пологих пластов очистными забоями, оборудованными механизированными комплексами.



а – шахта «Есаульская» (фото автора); б – зарубежное предприятие<sup>1</sup>  
Рисунок 18 – Формирующаяся зона обрушения (вид за секциями механизированной крепи)

<sup>1</sup> Galvin J.M. Ground Engineering: Principles and Practices for Underground Coal Mining. Cham: Springer International Publishing, 2016. 693 p.

Выполнено описание физической модели геомеханических процессов, протекающих в зоне обрушения и связанных с обрушением, разрыхлением и уплотнением горных пород.

1. Выемка пласта и создание пустоты после задвигания секций механизированной крепи вызывает изменение напряжённо-деформированного состояния участка геомассива посредством постепенного смещения слоёв непосредственной кровли. При увеличении длины выработанного пространства смещению подвергаются всё большие участки вмещающего массива, увеличивается прогиб слоёв кровли, получают интенсивное развитие системы трещин. В подобной квазисплошной среде нижние слои, смежные с пустотой, расслаиваются, отделяясь от вышележащих, дезинтегрируются и фрагментируются по системам трещин на блоки, размер которых соотносится с шагом между системами трещин естественного и технологического генезиса  $l_{тр}$ , м. Данные блоки, находясь в гравитационном поле, пакетами падают на почву выработанного пространства, а последующие на уже обрушенные. Выделяют первичные и последующие шаги посадок основной и непосредственной кровли.

2. В процессе падения на блоки действует момент силы, который при достаточной продолжительности влияния вызывает их вращательное движение. В связи с этим блоки поворачиваются и при достижении почвы укладываются закономерно, образуя «гребни» как по простиранию, так и по падению. Это происходит из-за наложения кусков породы друг на друга.

3. В местах данных гребней коэффициент разрыхления приобретает максимальные значения (до  $k_p = 2,0-2,1$ ). Над обрушенными пакетами блоков дезинтегрированных пород образуется пространство между уложенными фрагментами и сводом обрушения, которое именуется как свободная мощность  $h_{св}$ , м. Если  $h_{св} > (2,0-2,5)m_{обр.сл}$ , где  $m_{обр.сл}$  – мощность следующего обрушающегося слоя, распадающегося на блоки, м, то блоки этого слоя укладываются беспорядочно и со значениями  $k_p$ , равными  $k_{p,max}$ . В исследовании приняты следующие значения  $k_{p,max}$  в зависимости от вынимаемой мощности  $m_b$ , м (соответствующей исходной высоте обрушения): при  $m_b \in [1,2; 2,0]$   $k_{p,max} = 1,8$ ; при  $m_b \in (2,0; 3,5]$   $k_{p,max} = 2,0$ ; при  $m_b > 3,5$   $k_{p,max} = 2,1$ .

4. После отслоения, фрагментации на блоки и обрушения первого слоя пород в движение приходит второй слой и при достижении максимальных деформаций происходит и его обрушение. Размеры блоков, на которые фрагментируется второй слой, также определяются интенсивностью трещиноватости. Вследствие того, что породы предыдущего слоя при падении разрыхляются на величину  $k_p$ , высота падения блоков последующего слоя оказывается меньшей и, соответственно, величина разрыхления также снижается.

5. Обрушение последующих слоёв происходит аналогично с постепенным уменьшением свободной мощности  $h_{св}$  и величины коэффициента разрыхления  $k_p$ . Такая закономерность будет сохраняться до тех пор пока величина  $h_{св}$  между гребнями обрушившейся породы  $n$  и не обрушенным слоем  $n+1$  не снизится до величины меньшей мощности последнего слоя  $m_{обр.сл}$ .

6. В пределах рассматриваемой зоны обрушения при прочих равных условиях в процессе обрушения устанавливается градиент изменения величины  $k_p$ , направленный снизу вверх. Он обусловлен постепенным снижением высоты обрушения для последующих слоёв и, соответственно, уменьшением величины  $k_p$  и момента силы, приводящей падающие блоки во вращение. Коэффициент разрыхления пород в куполах зоны обрушения снижается до значений, находящихся в диапазоне 1,10-1,15.

7. Последующее развитие процесса сдвигания над зоной обрушения протекает без значимого увеличения объёма смещающихся участков геомассива (до 1-5 %). Фрагментированные на блоки слои вследствие продолжающегося смещения и техногенного трещинообразования сохраняют некоторое сцепление между собой. Коэффициенты разрыхления в этих условиях находятся в диапазоне величин до 1,01-1,05.

8. При сдвигании в более верхних слоях зоны трещин и разломов изменение объёма пород весьма незначительно и соответствует 0,3-0,5 % или коэффициентам разрыхления  $k_p$ , равным 1,003-1,005.

9. Процесс, описанный в пп.1-8, периодически повторяется на интервалах, кратных шагам посадки пород непосредственной и основной кровли. При этом формирующаяся зона сдвигания соответствует увеличивающемуся со временем эллипсоиду, положение поверхностей

которого по простиранию, падению и восстанию обрабатываемого пласта соответствует углам  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$ , являющимся внутренними углами полных сдвижений.

10. Подвигание очистного забоя и связанное с этим развитие процессов сдвижения детерминирует уплотнение пород, фрагментированных на блоки и уложенных в описанную выше систему с градиентом разрыхления. Данный процесс после иницирования при отработке пласта постепенно развивается от нижележащих слоёв пород кровли и вовлекает в сдвижение всё большее количество слоёв. В исследовании принято, что уплотнение начинается после обрушения пород основной кровли и максимальные значения коэффициента уплотнения по окончании активной стадии сдвижения принимаются равными 10 % от исходного  $k_p$  для данного пакета фрагментов пород.

Для увязывания геомеханических и аэрогазодинамических процессов на выемочном участке на основе описанной выше физической модели разработана соответствующая математическая модель. Она отличается от ранее предлагаемых учётом комплексного влияния следующих параметров:  $m_b, m$ ;  $h_{обр}, m$ ; коэффициенты  $k_{пр}, m^2, l_{ш}, m$ ; коэффициенты  $k_p$ , доли ед.,  $k_{упл}$ , доли ед.,  $k_{пс}$ , доли ед.;  $T_{пр}, T_{пад}$  и  $T_{вос}$ , сут;  $l_{тр}, m$ ;  $m_{обр.сл}, m$ ; шаги  $l_{о.к}, m$ , и  $l_{н.к}, m$ . Составленная система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} k_{пс.i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_1 \frac{h_{св.i}}{m_{обр.сл.i}} + k_2 \right); k_{пс.i} = k_{p.i} - 1; \\ \frac{\partial}{\partial x_i} h_{св.i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} (h_{св.пред.i} - m_{обр.сл.i} k_{пс.i}); \frac{\partial}{\partial t} k_{p.i.t} = k_{p.i} \frac{\partial}{\partial t} k_{упл.i}; \\ l_{н.к} &= 1,3 \frac{m_{н.к}}{m_b} + 1,2 f_{н.к} - 4,8; l_{о.к} = 1,7 \frac{m_{н.к}}{m_b} + 0,6 f_{о.к}^2 + 0,1 m_{о.к} - 7,5; \\ \frac{(y - y_{ц})^2}{l_{обр}^2} - \frac{(x - x_{ц})^2}{\left(\frac{l_{оз} - l_{к.н} - l_{к.в}}{2}\right)^2} &= 1; \\ V_{г.к(з.п)} &= \sum_{i=1}^n V_{эл.i} \begin{cases} V_{г.к} \text{ при } V_{эл.i} : x \in l_{г.к}, y \in l_{о.з}, z \in m_{сл} \\ V_{з.п} \text{ при } V_{эл.i} : x \in l_{г.к}, y \in l_{о.з}, z \in m_b \end{cases} \\ \frac{\partial}{\partial x_i} k_{пр.до.i} &= 0,62 \cdot 10^4 \cdot d_{эк}^2 \cdot \left( \frac{\partial}{\partial x_i} m_{п.о.i} \right)^3; \\ \frac{\partial}{\partial x_i} k_{пр.д.i} &= 2,08 \cdot d_{эк}^2 \cdot 10^4 \cdot \frac{\left( \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{2}{3} m_{п.о.i} + 2k_{пс.it} \right) \right)^3}{\left( 1 + \frac{\partial}{\partial x_i} k_{пс.it} \right)^4}; \\ \frac{\partial}{\partial x_i} l_{ш.i} &= \left( \frac{\partial}{\partial x_i} k_{пр.i} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left( \frac{\partial}{\partial x_i} m_{п.i} \right)^{-\frac{1}{2}}; \frac{\partial}{\partial x_i} m_{п.i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (m_{п.о.i} + (k_{p.it} + 1)/k_{p.it}); \\ \left\{ \begin{array}{l} l_{к.н} = \frac{h_{обр.сл}}{tg\Psi_1}, l_{к.в} = \frac{h_{обр.сл}}{tg\Psi_2} \text{ при } \alpha > 0 \\ l_{к.н} = l_{к.в} = \frac{h_{обр.сл}}{tg\Psi_3} \text{ при } \alpha = 0 \\ l_{к.н} = \frac{h_{обр.сл}}{tg\Psi_2}, l_{к.в} = \frac{h_{обр.сл}}{tg\Psi_1} \text{ при } \alpha > 0 \end{array} \right\}; \left\{ \begin{array}{l} T_{пр} = k_T \cdot \frac{H_{г.р}}{v_{о.з}} \cdot (ctg\delta_0 + ctg\Psi_3) \\ T_{пад} = k_T \cdot \frac{H_{г.р}}{v_{о.з}} \cdot \left( \frac{\cos(\Psi_1 + \alpha)}{\sin\Psi_1} + \frac{\cos\beta_0}{\sin(\beta_0 + \alpha)} \right); \\ T_{вос} = k_T \cdot \frac{H_{г.р}}{v_{о.з}} \cdot \left( \frac{\cos\gamma_0}{\sin(\gamma_0 - \alpha)} + \frac{\cos(\Psi_2 - \alpha)}{\sin\Psi_2} \right) \end{array} \right\}; \\ \nabla p = - \left[ \frac{\mu}{k_{пр.i}} + \frac{\rho}{l_{ш.i}} |U| \right] \cdot u_i; \begin{cases} k_1 = 0,3015, k_2 = 0,0546 \text{ при } k_{p,max} = 1,8 \\ k_1 = 0,3812, k_2 = 0,0590 \text{ при } k_{p,max} = 2,0 \\ k_1 = 0,4220, k_2 = 0,0566 \text{ при } k_{p,max} = 2,1 \end{cases} \end{aligned}$$

где  $d_{эк}$  – параметр, характеризующий размеры породообразующего зерна, мм;  $f_{о.к}, f_{н.к}$  – коэффициенты крепости пород непосредственной и основной кровли, соответственно, м;  $H_{г.р}$  – глубина ведения горных работ, м;  $h_{обр.сл}$  – расстояние от кровли разрабатываемого пласта до почвы об-

рушающегося слоя пород, м;  $h_{св.i}$ ,  $h_{св.пред.i}$  – осреднённые значения свободного пространства после обрушения очередного и предыдущего, соответственно, слоя пород кровли по осям декартовой системы координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  (далее – ДСК), м (для первого слоя  $h_{св} = m_b$ );  $k_1$ ,  $k_2$  – числовые константы разработанной модели обрушения, разрыхления и уплотнения дезинтегрированных пород, динамики их проницаемости и формирования пустот в зоне обрушения, доли ед.;  $k_{пс.i}$  – осреднённые значения коэффициента пустотности по осям ДСК (для  $i, j = 1, 2, 3$ ), доли ед.;  $k_{пр.д0.i}$ ,  $k_{пр.д.i}$  – осреднённые значения коэффициента проницаемости при отсутствии деформации (нетронутый массив) и в деформированной среде, соответственно, по осям ДСК, Д;  $k_{пр.i}$  – осреднённые значения коэффициента проницаемости в деформированной среде, м<sup>2</sup>;  $k_{р.i}$  – осреднённые значения коэффициента разрыхления по осям ДСК, доли ед.;  $k_{р.ит}$  – осреднённые значения коэффициента разрыхления уплотнённых пород в результате дальнейшего сдвижения геомассива, доли ед.;  $k_{р.мах}$  – максимальное значение коэффициента разрыхления при обрушении горных пород кровли, доли ед.;  $k_T$  – коэффициент, учитывающий влияние скорости подвигания забоя и глубины ведения работ, доли ед.;  $k_{упл.i}$  – осреднённые значения коэффициента уплотнения по осям ДСК, доли ед.;  $l_{к.н}$ ,  $l_{к.в}$  – длины зависших консолей со стороны нижнего и верхнего, соответственно, боков выемочного столба, м;  $l_{н.к}$ ,  $l_{о.к}$  – шаги обрушения пород непосредственной и основной кровли, соответственно, м;  $l_{обр}$  – шаг обрушения очередного слоя пород кровли, м;  $l_{оз}$  – длина очистного забоя, м;  $l_{ш.i}$  – осреднённые значения коэффициента макрошероховатости по осям ДСК, м;  $m_b$  – вынимаемая мощность пласта, м;  $m_{н.к}$ ,  $m_{о.к}$  – мощности вынимаемого пласта, пород непосредственной кровли и основной кровли, соответственно, м;  $m_{обр.сл.i}$  – мощность обрушающегося слоя, м;  $m_{п.0.i}$ ,  $m_{п.i}$  – осреднённые значения пористости нетронутого слоя геомассива и дезинтегрированной, разрыхленной, уплотнённой среды, соответственно, по осям ДСК, доли ед.;  $t$  – время отработки выемочного столба, сут;  $T_{пр}$ ,  $T_{пад}$ ,  $T_{вос}$  – продолжительность активной стадии процесса сдвижения геомассива при работе очистного забоя, соответственно, по простиранию, по падению и по восстанию, мес;  $V_{г.к}$ ,  $V_{з.п}$ ,  $V_{эл.i}$  – объёмы, соответственно, газового коллектора, закрепного пространства,  $i$ -го элемента незаполненного породами пространства, м<sup>3</sup>;  $m_{сл}$  – суммарная мощность обрушенных слоёв кровли, м;  $v_{о.з}$  – средняя скорость подвигания очистного забоя, м/мес;  $x$ ,  $x_{ц}$ ,  $y$ ,  $y_{ц}$  – координаты, соответственно, дуги и центра эллипса, м;  $\alpha$  – угол падения пласта, град;  $\beta_0$ ,  $\gamma_0$ ,  $\delta_0$  – внешние граничные углы сдвижения, град;  $\psi_1$ ,  $\psi_2$ ,  $\psi_3$  – внутренние углы полных сдвижений, град.

Применение данной системы уравнений позволяет выполнить расчёт динамики проницаемости пород в зоне обрушения, а также формирования в ней пустот. Для создания, настройки и верификации моделей выемочных участков при развитии геомеханических процессов для условий пологих пластов использованы наборы данных по горно-геологическим и горно-техническим условиям отработки выемочных столбов на пологих пластах действующих шахт, а также проницаемости фрагментов пород в зонах обрушения выемочных участков. Для оценки адекватности выполненных расчётов по значениям высоты зоны обрушения  $h_{обр}$ , м, использованы экспериментальные зависимости, полученные во ВНИМИ.

На рисунке 19 приведена схема, отображающая принцип построения моделей выемочных участков и используемые граничные условия. Применены следующие обозначения параметров:  $l_{вп}$  – длина выработанного пространства от погашенной монтажной камеры до очистного забоя, м;  $l_{г.к}$  – протяжённость участка выработанного пространства, используемая для оценки объёма газового коллектора, м;  $l_{hex.x}$ ,  $l_{hex.y}$ ,  $l_{hex.z}$  – линейные размеры элемента по осям ДСК, м;  $w_{огр}$  – принятая ширина секций механизированной крепи, м;  $w_{о.з}$  – длина участка пространства от забоя до ограждения крепи, м.

Для изучения приняты следующие объекты исследования на угледобывающих предприятиях: выемочный участок 16-17 (шахта «Абашевская»), выемочный участок 29-28 (шахта «Есаульская»), выемочный участок 823 (шахта «Листвяжная»), выемочный участок 1-1-5-6 бис (шахта «Осинниковская»), выемочный участок 3-1-9 (шахтоучасток «Сибиргинский»). Выемочный участок далее также по тексту сокращается до в/у.

С помощью средств языка программирования С++ разработан специализированный программный пакет «Аэродинамика», позволяющий рассчитать шаги обрушения пород кровли,



**Пятое защищаемое научное положение:** участок зоны обрушения, примыкающий к очистному забою, следует делить на три области: закрепное пространство, газовый коллектор, обрушенные и дезинтегрированные породы, на форму и размеры которых оказывают влияние: протяжённость призабойного пространства  $l_{оз}$ , мощность пласта, принятая к отработке  $t_в$ , структура, крепость  $f_{сл}$ , трещиноватость  $l_{тр}$  и мощность  $t_{сл}$  слоёв кровли. В зависимости от указанных параметров объём газового коллектора может составлять от 3 до 48 % объёма очистного забоя. В установившемся режиме посадки основной кровли объёмы газового коллектора и закрепного пространства изменяются взаимосвязано и ступеннеобразно. При этом данные изменения являются противоположно направленными: при увеличении объёма  $\Delta V_{г.к}$  (за счёт отделения блоков зависшей консоли и их падения) происходит уменьшение объёма  $\Delta V_{з.пр}$  и наоборот.

Результаты моделирования геомеханических процессов для условий рассматриваемых выемочных участков позволили получить данные о трёхмерном распределении коэффициентов разрыхления и проницаемости в пределах зоны обрушения с учётом продолжающегося процесса сдвижения вмещающей толщи (рисунок 20, соответственно, для выемочных участков: а – 16-17; б – 1-1-5-6 бис). Пространственный вид образующейся при ведении горных работ зоны обрушения для условий выемочного участка 16-17, полученный по результатам расчёта с использованием пакета «Аэродинамика», представлен на рисунке 21. Изображение выполнено в виде разреза зоны обрушения, построенного путём рассечения участка вертикальной плоскостью по центру очистного забоя.

Данные для построения графиков, представленных на рисунке 20, получены для нормали, восстановленной от почвы пласта к верхней границе расчётной области. Её положение принято по центру ширины выработанного пространства на расстоянии шага первичной посадки основной кровли от монтажной камеры. В таблице 3 приведены условия, для которых получены указанные значения коэффициентов разрыхления  $k_p$  и проницаемости  $k_{пр.д}$ .

Таблица 3 – Значения параметров формирующейся зоны обрушения, с использованием которых рассчитаны её аэродинамические параметры

№ п/п	Наименование выемочного участка	Длина выработанного пространства, м	Время с начала отработки, сут
1	в/у 16-17	975	200
2	в/у 1-1-5-6 бис	536	167
3	в/у 3-1-9	364	150
4	в/у 823	653	60
5	в/у 29-30	617	100

По результатам моделирования построены распределения проницаемости  $k_{пр.д}$  и разрыхления  $k_p$  обрушенных пород (рисунки 22 и 23), выполненные в соответствии с развивающимся процессом сдвижения подрабатываемого участка геомассива и постепенного уплотнения пород в зоне обрушения. Данные распределения соответствуют сечению, построенному вблизи почвы отрабатываемого пласта и параллельного ей. На рисунках 22 и 23 выделены призабойное пространство (1) и направление отработки столба (2). Горизонтальная ось  $x$  – длина выработанного участка выемочного столба, м. Для визуального представления числовых данных использована цветовая палитра вида «радуга», приведённая на рисунке 24. Расстояние между изолиниями по длине выработанного пространства отражает динамику подвигания очистного забоя в период отработки выемочного столба. Выполнено сравнение рассчитанной высоты зоны обрушения в программе «Аэродинамика» для условий пяти в/у с экспериментальными значениями, полученными по методике ВНИМИ. Максимальное расхождение не превысило 8,1 %.

По результатам математического моделирования выполнено построение геометрической формы образующихся пустот за пределами призабойного пространства при работе очистного оборудования по выемке пласта (рисунок 25). Для условий рассматриваемых шахт построены графики осцилляции значений объёмов закрепного пространства и газового коллектора

(колебание значений свободной мощности) при циклических процессах посадки кровли (рисунок 26). Используются следующие параметры:  $\Delta V_{г.к.}$ ,  $\Delta V_{з.пр.}$ ,  $\Delta V_{общ}$  – амплитуда изменения объёмов газового коллектора, закрепного пространства и общего объёма пустоты в зоне обрушения, соответственно  $м^3$ ;  $l_{г.к.}$ ,  $l_{з.п.}$  – протяжённость газового коллектора и закрепного пространства, соответственно, м;  $V_{о.з.}$  – объём призабойного пространства, ограниченного забоем и секциями механизированной крепи,  $м^3$ . В условиях наличия застойных зон и дебитов метана параметр  $\Delta V_{г.к.}$  определяет дополнительный объём метана, который при периодических посадках кровли может быть вытеснен в пространство действующих горных выработок.

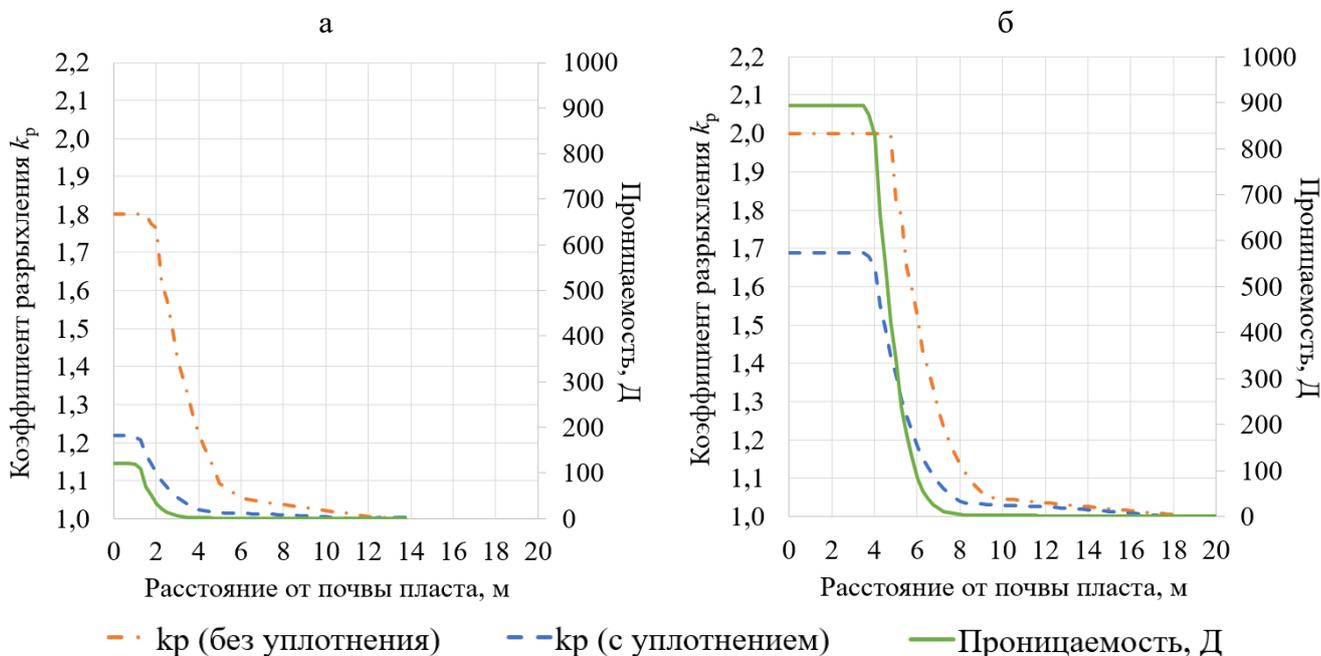


Рисунок 20 – Графики распределения значений коэффициентов разрыхления  $k_p$ , доли ед., и проницаемости дезинтегрированных пород  $k_{пр.Д}$ , Д, в зоне обрушения в зависимости от расстояния до почвы пласта

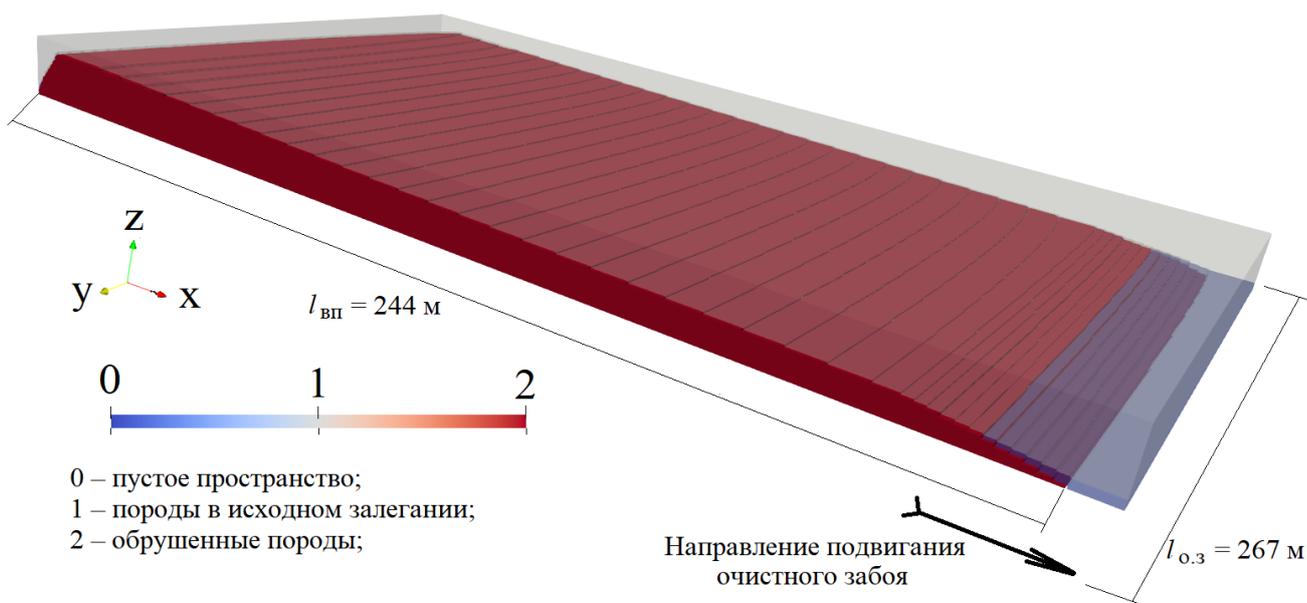


Рисунок 21 – Пространственный вид полученной зоны обрушения

Полученные результаты моделирования, приведённые на рисунке 25, наиболее соответствуют схеме сдвижения и обрушения горных пород кровли согласно гипотезе шарнирных блоков Г.Н. Кузнецова.

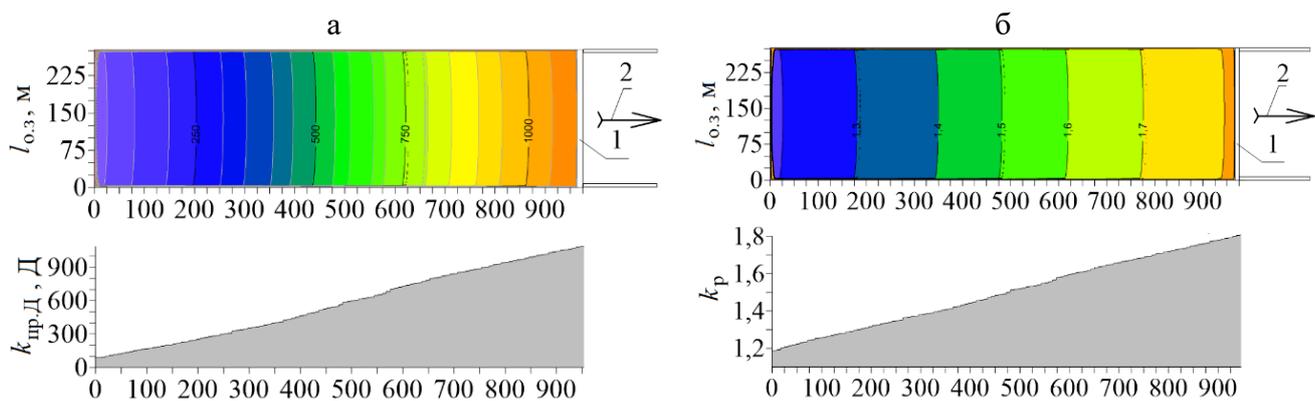


Рисунок 22 – Условия выемочного участка 16-17 шахты «Абашевская»

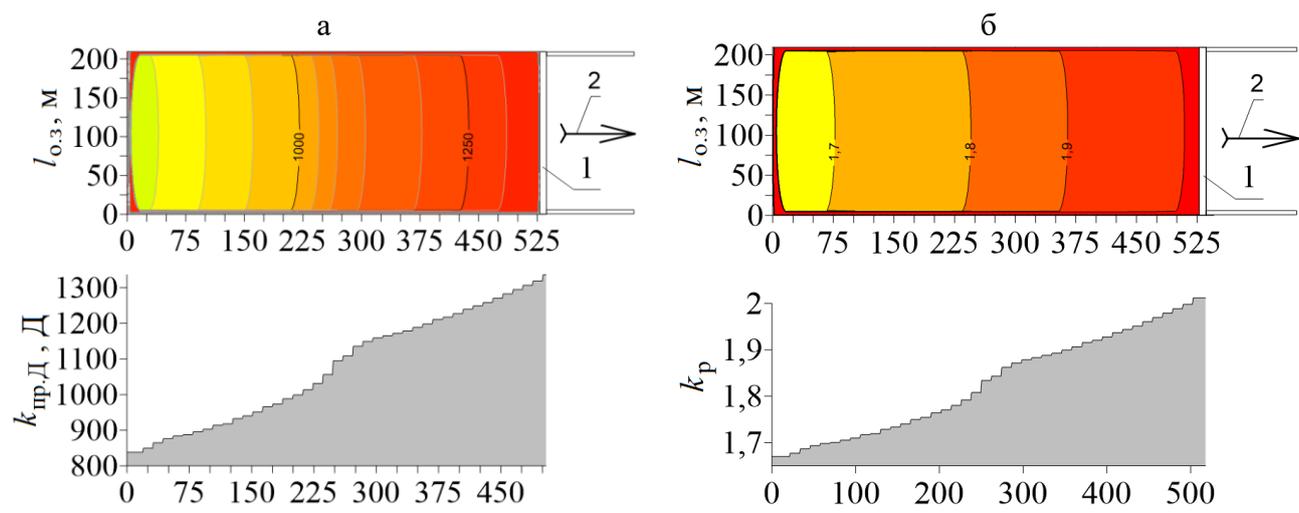


Рисунок 23 – Условия выемочного участка 1-1-5-6 бис шахты «Осинниковская»



Рисунок 24 – Цветовая схема к рисункам 22 и 23

В зависимости от горно-геологических условий отрабатываемого пласта и принятых горнотехнических решений подготовки выемочного столба зона обрушения в каждом наборе исходных данных обладает характерными формой и размерами как закрепного пространства, так и газового коллектора. Установлено, что определяющими параметрами являются: вынимаемая мощность  $m_b$ ; длина очистного забоя  $l_{0.3}$ ; среднесуточное подвигание забоя  $A_{сут}$ ; физико-механические свойства пород кровли (крепость слоёв, мощность, структурные особенности, интенсивность трещиноватости).

В механизме процессов посадок непосредственной и основной кровли идентифицируются два последовательных режима (рисунок 26):

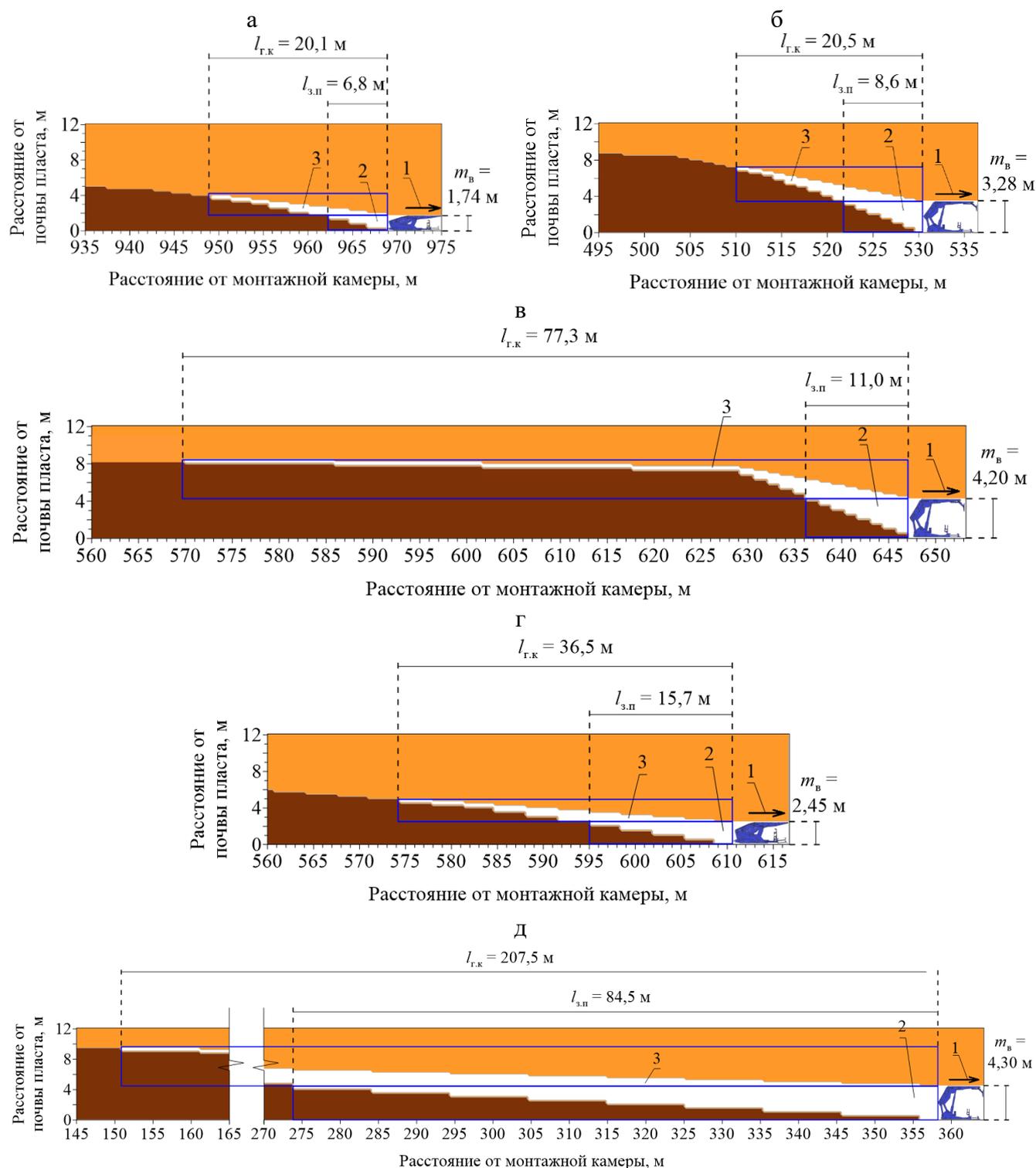
1. Начальный режим. Он характеризуется переходным состоянием, при котором параметры процессов посадки кровли находятся в стадии конфигурирования.

2. Установившийся режим. Отличается стабилизацией периодичности протекающих процессов. В данном режиме объёмы газового коллектора и закрепного пространства изменяются взаимосвязано и ступенеобразно. При этом данные изменения являются противоположно направленными, т. е.:

- при увеличении объёма  $\Delta V_{г.к}$  (за счёт отделения блоков зависшей консоли и их падения) уменьшается объём  $\Delta V_{з.пр}$  (обрушающиеся фрагменты пород заполняют этот объём);

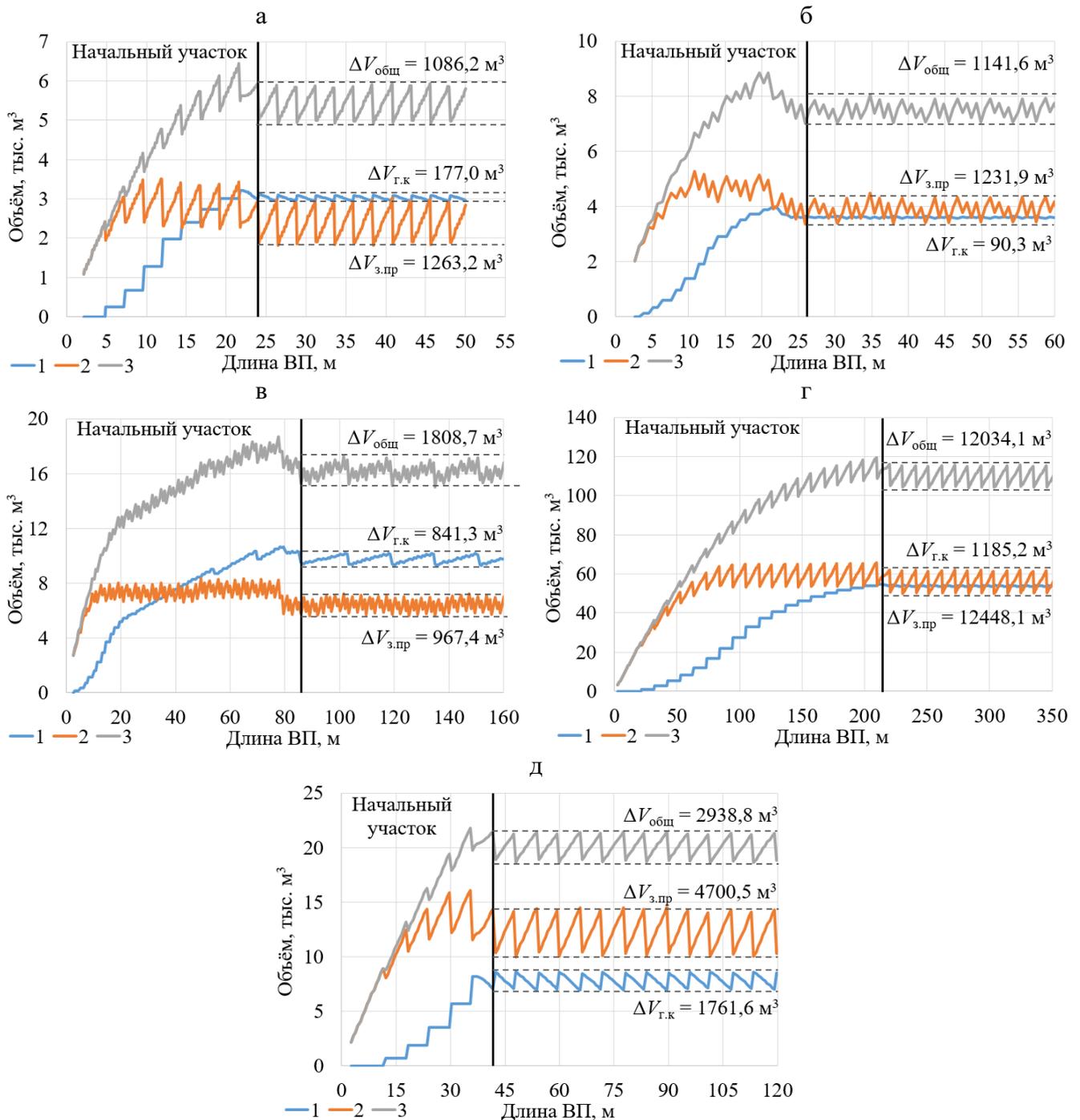
- при дальнейшем подвигании забоя объём  $\Delta V_{г.к}$  постепенно уменьшается (предыдущее пустое пространство заполняется при обрушении блоками вышележащих пород кровли, а новое

– начинает формироваться), а объём  $\Delta V_{з.пр}$  увеличивается (за счёт создания нового пустого пространства после выемки и передвижке секций механизированной крепи).



а – в/у 16-17; б – в/у 1-1-5-6 бис; в – в/у 823; г – в/у 29-30; д – в/у 3-1-9  
 Рисунок 25 – Формы и размеры закрепного пространства и газового коллектора

Таким образом, между параметрами  $\Delta V_{г.к}$  и  $\Delta V_{з.пр}$  фиксируется следующая корреляция: максимальному значению объёма  $\Delta V_{г.к}$  соответствует минимальный объём  $\Delta V_{з.пр}$  и наоборот. В рамках рассматриваемых объектов исследования полученные значения величин амплитуды изменения значений объёмов  $\Delta V_{г.к}$ ,  $\Delta V_{з.пр}$ ,  $\Delta V_{общ}$ , а также соотношения  $\Delta V_{г.к}$  к  $V_{о.з}$  и  $\Delta V_{з.пр}$  к  $V_{о.з}$  сведены в таблицу 4.



в/у: а – 16-17; б – 1-1-5-6 бис; в – 823; г – 3-1-9; д – 29-30

Рисунок 26 – Ритмичность изменения объёмов пустого пространства (газовый коллектор  $\Delta V_{\text{г.к}}$  – 1; закрепное пространство  $\Delta V_{\text{з.пр}}$  – 2; общий  $\Delta V_{\text{общ}}$  – 3) на участках зоны обрушения, примыкающих к призабойному пространству

Таблица 4 – Динамика значений объёмов в зоне обрушения в условиях рассматриваемых шахт

№ п/п	Наименование в/у	$\Delta V_{\text{г.к}}, \text{ м}^3$	$\Delta V_{\text{з.пр}}, \text{ м}^3$	$\Delta V_{\text{общ}}, \text{ м}^3$	$V_{\text{о.з}}, \text{ м}^3$	$\Delta V_{\text{г.к}}/V_{\text{о.з}},$ доли ед.	$\Delta V_{\text{з.пр}}/V_{\text{о.з}},$ доли ед.
1	в/у 16-17	177,0	1263,2	1086,2	2322,9	0,08	0,54
2	в/у 1-1-5-6 бис	90,3	1231,9	1141,6	3280,0	0,03	0,38
3	в/у 823	841,3	967,4	1808,7	4620,0	0,18	0,21
4	в/у 3-1-9	1185,2	12448,1	12034,1	5375,0	0,22	2,32
5	в/у 29-30	1761,6	4700,5	2938,8	3675,0	0,48	1,28

Из данных, приведённых в таблице 4, видно, что соотношение объёмов газового коллектора к пространству очистной выработки для рассматриваемых выемочных участков варьируется в диапазоне от 3 до 48 %, что определяет потенциальный уровень её загазирования при вытеснении метана из зоны обрушения.

Пятая **научная новизна** исследования состоит в следующем: разработана методическая основа оценки аэродинамических параметров закрепного пространства и газового коллектора, отличающаяся учётом таких параметров, как неравномерность нагрузки на очистной забой, вынимаемая мощность пласта, длина очистного забоя, структурные особенности кровли.

**Шестое защищаемое научное положение:** методология, основанная на совместном учёте элементов системы «горные выработки – зона обрушения – дезинтегрированные породы – источники метановыделения», позволяет оценивать геомеханические и аэрогазодинамические параметры процессов формирования купола обрушения и применять адаптируемые к существующим условиям системы управления газовой выделением, обеспечивающие высокий уровень безопасности горных работ и ритмичность добычи угля в очистном забое.

Полученные данные по коэффициентам  $\alpha$  горных выработок, аэродинамическим параметрам тупиков, а также результаты расчётов в пакете «Аэродинамика» (проницаемость обрушенных и уплотнённых пород, объёмы газового коллектора и закрепного пространства) являются исходными для моделирования аэрогазодинамических процессов на выемочном участке в широком диапазоне горно-геологических и горнотехнических условий (рисунок 27). Добавление в моделируемую систему дебитов метана из основных источников в зависимости от нагрузки на очистной забой обеспечит возможность такого моделирования с учётом процессов формирования газового коллектора в застойных зонах куполов обрушения. Для этих целей разработана программа «Вентиляция выемочных участков» (свидетельство о государственной регистрации № 2017614796). В таблице 5 приведены рассчитанные на основе замеров фактические дебиты метана в очистной забой и зону обрушения (по данным систем аэрогазового контроля). Из неё видно, что доля выработанных пространств в газовом балансе выемочных участков достигает 0,7-0,9. Для обеспечения нормативного уровня безопасности ведения подземных горных работ и ритмичности работы очистных забоев коэффициент эффективности дегазации должен иметь близкие значения.

Таблица 5 – Фактические аэрогазодинамические параметры выемочных участков угольных шахт, обрабатывающих пологие пласты механизированными комплексами

Выемочный участок	$I_{ф.оз}$ , м <sup>3</sup> /мин	$I_{ф.вп}$ , м <sup>3</sup> /мин	$I_{ф.уч}$ , м <sup>3</sup> /мин	Доля $I_{ф.вп}$ , м <sup>3</sup> /мин, в газовом балансе участка, доли ед.
в/у 16-17	8,32	35,67	43,99	0,81
в/у 1-1-5-6 бис	6,92	61,70	68,62	0,90
в/у 3-1-9	16,59	34,87	51,46	0,68
в/у 823	7,50	41,60	49,1	0,85
в/у 29-30	2,41	3,79 (+34,76*)	40,96	0,94

**Примечание.**  $I_{ф.оз}$ ,  $I_{ф.вп}$  – фактические дебиты метана, соответственно, в очистной забой и выработанное пространство, м<sup>3</sup>/мин;  $I_{ф.уч}$  – фактический дебит метана на участок (газовый баланс), м<sup>3</sup>/мин; \*Дебит метана в дегазационные скважины

Результаты моделирования процессов метанопереноса и метанонакопления в контексте аэрогазодинамических процессов позволяют выстраивать систему управления газовой выделением по интеллектуальному принципу с возможностью адаптации горнотехнических параметров к изменяющимся горно-геологическим условиям. Это предоставляет возможность обрабатывать пологие угольные пласты с использованием высокоинтенсивных технологий очистными забоями, оборудованными механизированными комплексами, и обеспечить высокий уровень безопасности горных работ и ритмичность добычи угля.

Таким образом, использование установленных закономерностей взаимовлияния геомеханических и аэрогазодинамических процессов при совместном учёте элементов системы «гор-

ные выработки – зона обрушения – дезинтегрированные породы – источники метановыделения» позволяет:

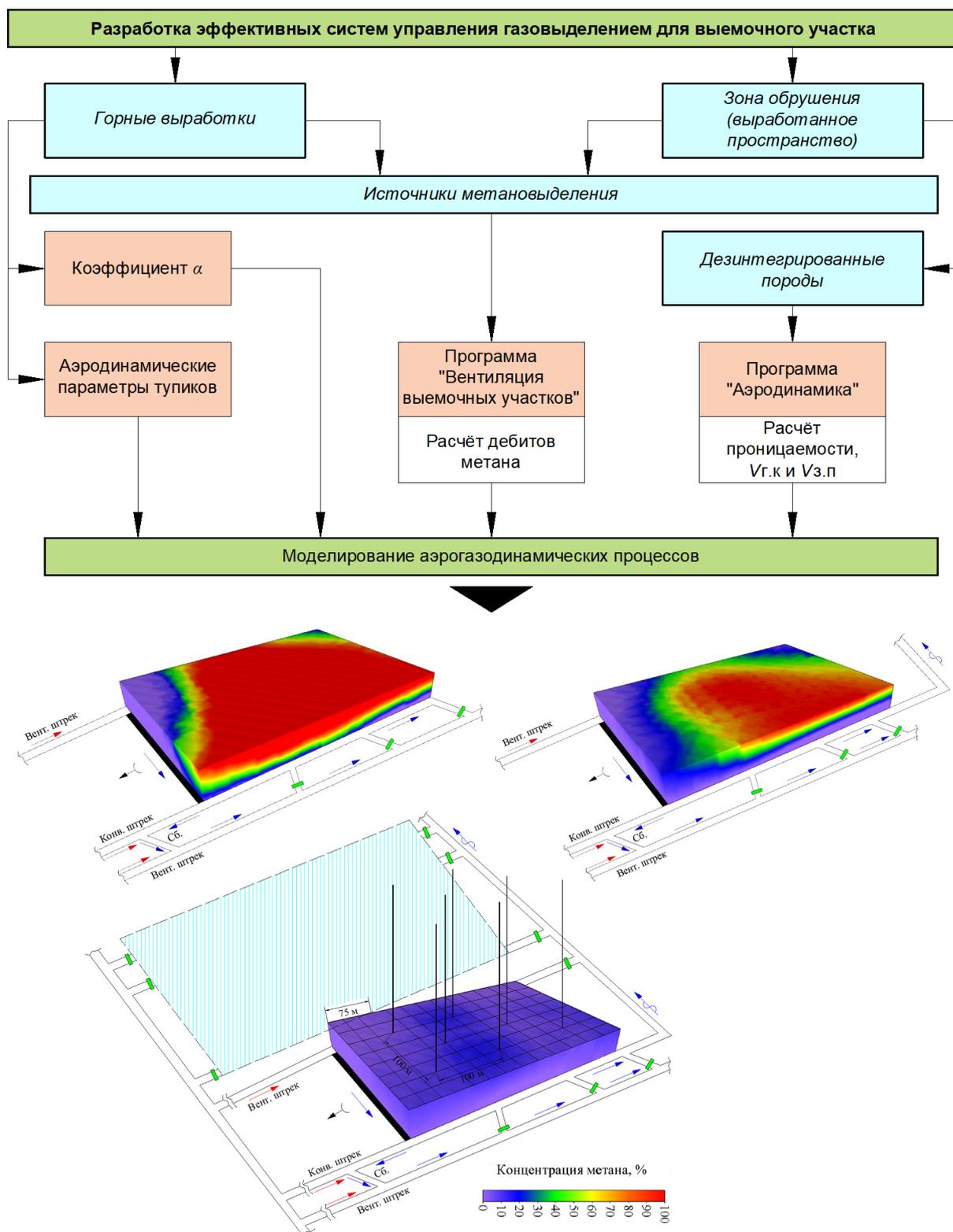


Рисунок 27 – Схема реализации подхода, учитывающего взаимодействующие геомеханические и аэрогазодинамические процессы для адаптации систем управления газовыделением

- выполнять анализ перспективных направлений отработки запасов в шахтном поле с учётом возможности оптимизации параметров шахтных вентиляционных сетей;
- разрабатывать адаптируемые к текущим горно-геологическим и горнотехническим условиям системы управления газовыделением;

- выполнять прогноз и осуществлять контроль фильтрационных потоков метановоздушной смеси в высокопроницаемой среде и её движение в сформированных пустотах;
- определять участки зоны обрушения, где формируется газовый коллектор с большими объёмами метана.

Шестая **научная новизна** исследования состоит в следующем: обоснованы направления адаптации систем управления газовыделением при комбинации протекающих процессов, отличающиеся возможностью выполнения прогноза параметров процесса формирования газового коллектора.

## Заключение

Диссертация на соискание учёной степени доктора наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена научная проблема управления газовыделением на выемочных участках при высокоинтенсивной отработке пологих пластов очистными забоями, оборудованными механизированными комплексами.

**Основные научные результаты, выводы и рекомендации** сводятся к следующему:

1. По результатам анализа фактических данных по метанообильности выработанных пространств, их сравнения с расчётными значениями, а также фактической нагрузкой на очистные забои установлено значительное влияние газового коллектора, формирующегося в зонах обрушения, на аэрогазодинамические процессы на выемочных участках. Зона обрушения обладает инерционностью, т. е. максимальные дебиты метана не всегда соответствуют максимальным нагрузкам на очистной забой. При этом данная инерционность сглаживает динамику выделения метана, что выражается в том, что изменение нагрузки не приводит сразу же к аналогичному изменению дебита метана из зоны обрушения. В связи с этим отмечаются расхождения между фактическими и расчётными данными, которые в среднем могут достигать 150-300 %. Максимальные дебиты метана из зоны обрушения могут составлять 80-130 м<sup>3</sup>/мин, а в действующие горные выработки – 45 м<sup>3</sup>/мин и более.

2. Разработана программа «Вентиляция выемочных участков», позволяющая выполнять автоматизированный расчёт фактических дебитов метана на выемочном участке и фактической газоносности по замерам расходов воздуха и концентраций метана (свидетельство о государственной регистрации № 2017614796). С её помощью определены фактические дебиты метана и фактическая газоносность объектов исследования.

3. Выполнено сопоставление изменения давления в секциях механизированной крепи, ассоциированных в группы, с динамикой дебитов метана на исходящей струе из очистного забоя в условиях выемочного участка 16-17. По результатам обосновано значительное влияние газового коллектора на метанобезопасность работ и необходимость совместного учёта элементов системы «горные выработки – зона обрушения – дезинтегрированные породы – источники метановыделения» при протекании взаимодействующих геомеханических и аэрогазодинамических процессов в зоне обрушения геомассива.

4. Выполнено численное моделирование процессов воздухораспределения на выемочном участке с учётом зоны обрушения как части шахтной вентиляционной сети. Рассмотрены три группы схем проветривания с изолированным отводом метановоздушной смеси из выработанного пространства: по примыкающему участку зоны обрушения к очистному забою, по участку зоны обрушения, ограниченному между очистным забоем и отстающей сбойкой, и по неограниченному участку зоны обрушения. Оценены радиусы кривизны линий тока фильтрационных потоков в зоне обрушения и потенциальная возможность концентрированного выноса метана утечками воздуха при формировании газового коллектора. Установлены аэродинамические особенности применяемых схем проветривания в части наличия застойных зон, непрветриваемых утечками воздуха, и в которых возможно накопление метана.

5. По результатам обработки фактических данных получены зависимости  $\alpha(S)$  для выработок, закреплённых рамной металлической (арочной) и анкерной крепью, отличающиеся широким диапазоном применения (6,0-24,0 м<sup>2</sup>), суженный для рамной крепи с шагом установки

$l_{кр} = 0,5$  м до  $17 \text{ м}^2$ . Установлено, что для современных подземных горных выработок с площадью поперечного сечения свыше  $16 \text{ м}^2$  существует недостаток данных по их аэродинамическим параметрам.

6. Выполнено исследование и получены значения коэффициентов  $\alpha$  для выработок, закреплённых анкерной крепью. Установлено, что высота выступов шероховатости в современных технологических условиях проведения выработок составляет  $k_b = 107$  мм. Получены коэффициенты  $\alpha$  для выработок с площадью сечения  $S$  от  $10,0$  до  $36,0 \text{ м}^2$  (высота –  $h = 2,0$ - $6,0$  м; ширина –  $w = 5,0$ - $6,0$  м). Расхождение полученных значений коэффициентов  $\alpha$  от данных практических замеров на интервале площадей поперечных сечений  $S$  от  $10,0$  до  $16,0 \text{ м}^2$  составило до  $10,0 \%$ .

7. Определены значения коэффициентов  $\alpha$  для подземных горных выработок с арочной крепью с учётом ранжирования по номеру спецпрофиля. Приведены соответствующие аппроксимирующие зависимости  $\alpha(S)$ . Полученные значения соотносятся со следующими условиями: прямолинейный участок горной выработки с арочной крепью; выработка чистая (не захламлена оборудованием, материалами и пр.); смещение рам относительно центральной оси выработки отсутствует; площадь поперечного сечения  $S$  от  $8,2$  до  $37,7 \text{ м}^2$ ; рамы крепи установлены равномерно с шагом  $l_{кр} = 0,3$ - $1,2$  м.

8. Для указанных идеальных условий по коэффициенту  $\alpha$  определён коэффициент аэродинамического старения подземных горных выработок, закреплённых рамной металлической (арочной) крепью, равный  $C_\alpha = 1,44$ . Расхождение полученных значений от данных практических замеров на интервале площадей сечений  $S$  от  $10,0$  до  $16,0 \text{ м}^2$  составило при шаге установки рам  $l_{кр} = 0,5$  м до  $8,4 \%$ , а при шаге  $l_{кр} = 1,0$  м – до  $13,3 \%$ .

9. Выполнены экспериментальные исследования движения воздуха в тупиках, проветриваемых за счёт турбулентной диффузии. Получены распределения скоростей воздуха в них для трёх вариантов топологии сети выработок. Установлено, что в тупике создаётся пространственное вихревое движение воздуха, на скорость и размеры которого оказывают влияние геометрические размеры выработки, угол примыкания тупика к сквозной выработке, а также скорость потока воздуха, проходящего по сквозной выработке. Выполнено сравнение полученных фактических данных с результатами численного моделирования. Относительная погрешность не превысила  $13,3 \%$ .

10. Выполнено численное исследование аэродинамических особенностей тупиков, проветриваемых за счёт турбулентной диффузии. Для этой цели разработана методика и масштабируемая геометрическая основа для формирования моделей тупиков с возможностью использования широкого спектра площадей поперечных сечений  $S$  горных выработок. Матрица исходных данных: ширина тупика  $w_t$  от  $5,0$  до  $6,0$  м, высота  $h_t$  – от  $2,0$  до  $3,0$  м, площадь поперечного сечения  $S$  от  $6,0$  до  $18,0 \text{ м}^2$ , скорость потока в сквозной выработке  $u$  – от  $0,15$  до  $6,0$  м/с. Установлено, что длина проветриваемого участка определяется размерами первого пространственного вихря, диаметр которого составляет от  $4,9$  до  $12,4$  м. Зависимости длины проветриваемых зон от высоты и ширины тупика являются близкими к линейным. Длины этих участков возрастают при увеличении площади поперечного сечения тупика. При этом установлено, что требования действующих нормативных документов, регламентирующих параметры рудничной атмосферы в выработках угольной шахты, являются обоснованными, но только для тех случаев, когда скорость воздуха в сквозной выработке более  $1$  м/с. В этом случае обеспечивается минимальная скорость воздуха в тупике, равная  $0,15$  м/с, на расстояниях от устья до  $6,0$  м (для газовых шахт).

11. Построена физическая модель, описывающая последовательность геомеханических процессов, происходящих при формировании выработанного пространства и зоны обрушения: посадка кровли, дезинтегрирование и фрагментирование пород на блоки; разрыхление и уплотнение при дальнейшей активной стадии процессов сдвижения. Для увязывания геомеханических и аэрогазодинамических процессов на выемочном участке разработана соответствующая математическая модель. Она отличается от ранее предлагаемых учётом комплексного влияния

следующих параметров:  $t_v$ , м;  $h_{обр}$ , м; коэффициенты  $k_{пр}$ , м<sup>2</sup>,  $l_{ш}$ , м; коэффициенты  $k_p$ , доли ед.,  $k_{упл}$ , доли ед.,  $k_{пс}$ , доли ед.;  $T_{пр}$ ,  $T_{пад}$  и  $T_{вос}$ , сут;  $l_{тр}$ , м;  $m_{обр.сл}$ , м; шаги  $l_{о.к}$ , м, и  $l_{н.к}$ , м.

12. Разработана программа «Аэродинамика», в которой реализована математическая модель, связывающая геомеханические и аэрогазодинамические процессы, протекающие в зонах обрушения и нижней части зон трещин и разломов. С её использованием получены коэффициенты проницаемости и макрошероховатости обрушенных пород. Установлено, что проницаемость  $k_{пр.д}$  техногенно сформированного участка дезинтегрированного геомассива при исходной пористости пород от 1,0 до 10,0 % в зоне обрушения составляет: при  $k_{р.мах} = 1,8$  –  $k_{пр.д} = 1020-1140$  Д (8,8-22,2 Д); при  $k_{р.мах} = 2,0$  –  $k_{пр.д} = 1310-1430$  Д (15,6-33,5 Д); при  $k_{р.мах} = 2,1$  –  $k_{пр.д} = 1430-1550$  Д (19,9-40,2 Д). Значения проницаемости верхней части зоны обрушения составляют 2,15-8,19 Д (0,05-1,62 Д), а нижней части зоны трещин и разломов – 0,39-3,38 Д (0,01-1,14 Д). В скобках приведена проницаемость уплотнённой среды зоны обрушения.

13. Выявлен комплекс параметров, детерминирующих влияние на геометрические параметры как закрепного пространства, так и газового коллектора в зоне обрушения. К ним относятся: вынимаемая мощность  $t_v$ , м; ширина выемочного столба  $l_{о.з}$ , м; крепость пород кровли  $f_{сл}$  и их структурные особенности пород кровли; мощность обрушающихся пород кровли  $m_{сл}$ , м; интенсивность естественных и техногенных трещин слоёв кровли. Идентифицированы два последовательных режима работы кровли: начальный, характеризующийся переходным состоянием, при котором параметры процессов посадки кровли находятся в стадии конфигурирования; установившийся, отличающийся стабилизацией периодичности протекающих процессов. В установившемся режиме объёмы газового коллектора и закрепного пространства изменяются взаимосвязано и ступенеобразно. При этом данные изменения являются противоположно направленными. Например, при увеличении объёма  $\Delta V_{г.к}$  (за счёт отделения блоков зависшей консоли и их падения) происходит уменьшение объёма  $\Delta V_{з.пр}$  (обрушающиеся фрагменты пород кровли заполняют этот объём).

14. Амплитуда изменения объёма газового коллектора определяет дополнительные объёмы метана, вытесняемого в действующие выработки выемочного участка. В зависимости от горно-геологических и горнотехнических параметров данный объём может составлять от 3 до 48 % объёма очистного забоя.

15. Установлено, что доля выработанного пространства в газовом балансе выемочных участков достигает 0,7-0,9. Для обеспечения нормативного уровня безопасности ведения подземных горных работ и ритмичности работы очистных забоев коэффициент эффективности дегазации должен иметь близкие значения. Предложено использование результатов моделирования геомеханических и аэрогазодинамических процессов с учётом совместного влияния элементов системы «горные выработки – зона обрушения – дезинтегрированные породы – источники метановыделения» для целей разработки адаптируемых к конкретным горно-геологическим и горнотехническим условиям систем управления газовой выделением при высокоинтенсивной отработке пологих угольных пластов очистными забоями, оборудованными механизированными комплексами.

16. Результаты исследований могут быть использованы в качестве предложений по разработке «Рекомендаций по проектированию вентиляции и дегазации выемочных участков» для внесения изменений в федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности.

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Научные публикации, входящие в перечень ВАК России:

1. **Говорухин Ю.М.** Закономерности изменения объёмов пустот на участках зон обрушения, примыкающих к очистному забою при отработке пологих пластов угля / **Ю.М. Говорухин**, С.С. Кубрин // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – Кемерово. 2, 2025. – С.5-12 (DOI: 10.25558/VOSTNIK.2025.39.78.001).

2. **Говорухин Ю.М.** Центр поддержки принятия решений как инструмент экспертного и научного сопровождения горноспасательных работ / **Ю.М. Говорухин**, В.Г. Криволапов,

- С.А. Петров, К.В. Кондаков, С.С. Кубрин // Безопасность труда в промышленности: научно-производственный журнал. – М., 2025. – № 5. – С.42-48 (DOI: 10.24000/0409-2961-2025-5-42-48).
3. **Говорухин Ю.М.** О проницаемости обрушенных и дезинтегрированных пород в выработанном пространстве выемочных участков при высокоинтенсивной отработке пластов угля / **Ю.М. Говорухин**, С.С. Кубрин // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – Кемерово. 1, 2025. – С.5-20 (DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.86.87.001).
4. **Говорухин Ю.М.** О значениях коэффициентов аэродинамических сопротивлений трения горных выработок больших поперечных сечений / **Ю.М. Говорухин**, С.С. Кубрин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – Тула, 2024. – № 2. – С.425-439.
5. **Говорухин Ю.М.** Геомеханические основы разработки схем проветривания выемочных участков и обеспечения промышленной безопасности при высокоинтенсивной отработке выемочных столбов / **Ю.М. Говорухин**, В.Г. Криволапов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – Кемерово. 1, 2024. – С.17-26 (DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.53.29.003).
6. **Говорухин Ю.М.** О фактических аэродинамических сопротивлениях горных выработок, полученных в ходе воздушно-депресссионных съёмок на угольных шахтах / **Ю.М. Говорухин**, А.Н. Домрачев, В.Г. Криволапов, Д.Ю. Палеев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – Тула, 2022. – № 3. – С.251-261.
7. Домрачев А.Н. Оценка влияния состояния подготовительных выработок на показатели работы короткого забоя / А.Н. Домрачев, **Ю.М. Говорухин**, Д.Ю. Палеев, И.М. Поздеева // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – Тула, 2021. – № 4. – С.352-356 (DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-352-356).
8. Домрачев А.Н. Об использовании аппарата нечёткой логики для повышения адекватности моделей шахтных вентиляционных сетей при решении задач инженерного обеспечения аварийно-спасательных работ / А.Н. Домрачев, **Ю.М. Говорухин**, В.Г. Криволапов, Д.Ю. Палеев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – Тула, 2021. – № 4. – С.204-208 (DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-204-208).
9. **Говорухин Ю.М.** Исследование аэродинамических особенностей тупиковых выработок, проветриваемых за счёт турбулентной диффузии / **Ю.М. Говорухин**, В.Г. Криволапов, Д.Ю. Палеев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – Тула, 2020. – № 1. – С.392-400 (DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-392-400).
10. **Говорухин Ю.М.** Численное моделирование взаимодействующих геомеханических и аэродинамических процессов на выемочном участке / **Ю.М. Говорухин**, В.Н. Фрянов, Д.Ю. Палеев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – Тула, 2019. – № 2. – С.288-299.
11. Риб С.В. Разработка комплексного метода исследования геомеханических процессов при интеграции физического и численного моделирования / С.В. Риб, **Ю.М. Говорухин** // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – Тула, 2018. – № 2. – С.363-378.
12. Домрачев А.Н. Разработка и внедрение в учебный процесс системы поддержки принятия решений при разработке технологической схемы очистного участка / А.Н. Домрачев, **Ю.М. Говорухин** // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – Тула, 2018. – № 1. – С.159-165.
13. **Говорухин Ю.М.** Об эффективности дегазации выемочных участков для условий толстых пластов юга Кузбасса / **Ю.М. Говорухин**, А.Н. Домрачев, В.Г. Криволапов, Д.Ю. Палеев, Ю.М. Филатов // Безопасность труда в промышленности: научно-производственный журнал. – М., 2017. – № 12. – С.11-17 (DOI: 10.24000/0409-2961-2017-12-11-17).
14. Домрачев А.Н. Использование аппарата нейронных сетей и нечёткой логики при оценке вероятности взрыва пылеметановоздушной смеси / А.Н. Домрачев, Д.Ю. Палеев, **Ю.М. Говорухин**, В.Г. Криволапов, В.И. Липатин // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – Кемерово. 1, 2014. – С.40-43.
15. Домрачев А.Н. К вопросу об оценке трудоёмкости ведения аварийно-спасательных работ на горных предприятиях / А.Н. Домрачев, Д.Ю. Палеев, **Ю.М. Говорухин**,

В.Г. Криволапов, В.И. Липатин // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – Кемерово. 1, 2014. – С.37-39.

16. Домрачев А.Н. Использование экспертных методов и методов теории игр при принятии решений в ходе аварийно-спасательных работ / А.Н. Домрачев, Д.Ю. Палеев, **Ю.М. Говорухин**, В.Г. Криволапов, В.И. Липатин // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – Кемерово. 1, 2014. – С.33-36.

17. Лукин М.К. Аэродинамический способ торможения окислительных процессов в выработанных пространствах угольных шахт / М.К. Лукин, **Ю.М. Говорухин** // Горный информационно-аналитический бюллетень – М.: Издательство «Горная книга», № 5, 2013. – С.251-255.

18. **Говорухин Ю.М.** Методология моделирования фильтрации газоздушных смесей в выработанном пространстве выемочного участка / **Ю.М. Говорухин**, А.Н. Домрачев, В.Г. Криволапов, Д.Ю. Палеев, М.Ю. Балаганский // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – Кемерово. 1, 2011. – С.72-76.

19. **Говорухин Ю.М.** Сравнительная оценка фактического и проектного метановыделения в выработанное пространство угольных шахт / **Ю.М. Говорухин**, В.Г. Криволапов, Д.Ю. Палеев, А.Н. Кнышенко // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – Кемерово. 1, 2010. – С.27-30.

20. Криволапов В.Г. Проектная и фактическая эффективность дегазации на высокогазодельных шахтах / В.Г. Криволапов, **Ю.М. Говорухин**, Д.Ю. Палеев // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – Кемерово. 1, 2009. – С.48-53.

#### **Другие научные публикации:**

21. **Govorukhin Yu.**, Kubrin S. (2024) An integrated approach to the development of effective gas emission control systems at coal mines excavation sites In Abstracts of the International Conference, dedicated to the 70th anniversary of the Geophysical Center of the RAS and the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences «Data Science, Geoinformatics and Systems Analysis in Geosciences» 25-27 September 2024, Suzdal, Russian Federation, 12(1), BS1002, p.87 (DOI: 10.2205/2024-GCRAS70).

22. **Говорухин Ю.М.** О перспективном направлении повышения эффективности управления газовой выделением на выемочных участках угольных шахт / **Ю.М. Говорухин**, С.С. Кубрин // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2024. – № 10 – С.265-270 (DOI 10.5281/zenodo.14739990).

23. **Говорухин Ю.М.** К вопросу об оценке адекватности модели шахтной вентиляционной сети / **Ю.М. Говорухин**, А.Н. Домрачев, В.Г. Криволапов, Д.Ю. Палеев, И.М. Поздеева // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2022. – № 8 – С.349-352.

24. **Говорухин Ю.М.** Разработка системы имитационного моделирования очистных работ в длинном комплексно-механизированном забое при переходе разрывного нарушения / **Ю.М. Говорухин**, А.Н. Домрачев, В.Г. Криволапов, Д.Ю. Палеев, И.М. Поздеева // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2022. – № 8. – С.352-354.

25. **Говорухин Ю.М.** О методе оценки объемов загазования взрывоопасной метановоздушной смесью горных выработок угольных шахт / **Ю.М. Говорухин**, А.Н. Домрачев, В.Г. Криволапов, Д.Ю. Палеев // Безопасность технологических процессов и производств. Труды III Международной научно-практической конференции. – Екатеринбург, 2021. – С.13-18.

26. **Говорухин Ю.М.** О способе внесения в модель топологии объемов загазования в закрепном пространстве выемочных участков при расчётах взрывобезопасных расстояний / **Ю.М. Говорухин**, В.Г. Криволапов, Д.Ю. Палеев // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2020. – № 6. – С.373-375.

27. **Govorukhin Yu.** Numerical studies of the aerodynamic features of dead-end entries with side junction / **Yu. Govorukhin**, V. Krivolapov, D. Paleev, V. Portola // E3S Web of Conferences. 5. Sep. "5th International Innovative Mining Symposium, IIMS 2020", 2020. – С.01057 (DOI: 10.1051/e3sconf/202017401057).

28. **Говорухин Ю.М.** Моделирование численными методами процессов обрушения пород кровли / **Ю.М. Говорухин**, С.В. Риб, А.М. Никитина, В.Н. Фрянов // Горный журнал. – М., 2019. – № 4. – С.23-26 (DOI: 10.17580/gzh.2019.04.05).

29. **Говорухин Ю.М.** Повышение качества и оперативности выполнения инженерных расчётов при ведении горноспасательных работ / **Ю.М. Говорухин**, В.Г. Криволапов, Д.Ю. Палеев, А.Н. Домрачев // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2019. – № 5. – С.450-453.

30. **Говорухин Ю.М.** Анализ существующих алгоритмов оценки дебитов метана из разрабатываемых пологих пластов с целью определения структуры газового баланса выемочных участков / **Ю.М. Говорухин**, В.Г. Криволапов, Д.Ю. Палеев // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2019. – № 5 – С.445-448.

31. Домрачев А.Н. Анализ и прогноз динамики аварий и инцидентов на предприятиях горной промышленности и подземного строительства Российской Федерации / А.Н. Домрачев, **Ю.М. Говорухин**, В.Г. Криволапов, Д.Ю. Палеев // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2019. – № 5. – С.448-450.

32. **Говорухин Ю.М.** Использование CFD-пакетов при решении задач вентиляции шахт и подготовке горных инженеров / Ю.М. Говорухин, В.Г. Криволапов, Д.Ю. Палеев // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2019. – № 5 – С.453-458.

33. Домрачев А.Н. Алгоритм вероятностной оценки длительности простоев комплексно-механизированного очистного забоя / А.Н. Домрачев, С.В. Риб, **Ю.М. Говорухин**, В.Г. Криволапов // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2017. – № 3. – С.153-155.

34. Domrachev A.N. Algorithm of probabilistic assessment of fully-mechanized longwall downtime / A.N. Domrachev, S.V. Rib, **Yu.M. Govorukhin**, V.G. Krivopalov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources. – 2017. – Vol. 84: KTDMUR 2017, Novokuznetsk, Russia, 6-9 June 2017. – P.012006 (DOI: 10.1088/1755-1315/84/1/012006).

35. **Говорухин Ю.М.** Математическое моделирование миграции метана в горные выработки при остановленном очистном забое / **Ю.М. Говорухин**, А.Н. Домрачев, В.Г. Криволапов, Д.Ю. Палеев // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2017. – № 3 – С.424-429.

36. **Govorukhin Yu.M.** Mathematical modeling of methane migration into the mine workings during the face downtime / **Yu.M. Govorukhin**, D.Yu. Paleev, A.N. Domrachev, V.G. Krivopalov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources. – 2017. – Vol. 84: KTDMUR 2017, Novokuznetsk, Russia, 6-9 June 2017. – P.012041 (DOI: 10.1088/1755-1315/84/1/012041).

37. Домрачев А.Н. Анализ методологии оценки риска обрушения подземных горных выработок / А.Н. Домрачев, **Ю.М. Говорухин**, В.Г. Криволапов, Д.Ю. Палеев // Eurasian Physical Technical Journal, 2016. – Vol.13. – No.2 (26). – Pp.24-29.

38. **Говорухин Ю.М.** Программа расчёта вентиляции выемочных участков / **Ю.М. Говорухин**, В.Г. Криволапов, А.Н. Домрачев, О.Ю. Лукашов // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2016. – №2 – С.445-448.

39. Домрачев А.Н. Методология анализа и оценки риска при ведении аварийно-спасательных работ на горных предприятиях: монография / А.Н. Домрачев, В.Г. Криволапов, **Ю.М. Говорухин**, А.В. Масленков. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2013. – 204 с.

40. Криволапов В.Г. Повышение качества воздушно-депресссионных съёмов / В.Г. Криволапов, В.А. Осягина, **Ю.М. Говорухин** // XXIV Международная научно-практическая конференция по проблемам пожарной безопасности, посвящённая 75-летию создания ФГБУ ВНИИПО МЧС России: Тезисы докладов. Ч. 3. – М. – 2012. – С.371-373.

41. **Говорухин Ю.М.** Методика расчёта распределения коэффициента разрыхления в зоне обрушения при отработке пологих пластов средней мощности Кузбасса / **Ю.М. Говорухин**, Д.Ю. Палеев // XXIV Международная научно-практическая конференция по проблемам пожарной безопасности, посвящённая 75-летию создания ФГБУ ВНИИПО МЧС России: Тезисы докладов. Ч. 3. – М. – 2012. – С.254-256.

42. Фрянов В.Н. Исследование влияния дизъюнктивных нарушений на эффективность дегазации угольных пластов / В.Н. Фрянов, В.Г. Криволапов, О.В. Фрянова, **Ю.М. Говорухин**, О.А. Петрова // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Труды международной научно-практической конференции – Кемерово: Сибирское отделение Российской академии наук, Институт угля СО РАН, Институт углехимии и химического материаловедения СО РАН, Кузбасс. гос. техн. ун-т, ООО КВК «Экспо-Сибирь», 2011. – С.64-69.

43. **Говорухин Ю.М.** Методика разработки исходных данных для моделирования геомеханических процессов, происходящих в выработанном пространстве / **Ю.М. Говорухин** // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. статей / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2011. – С.112-115.

44. **Говорухин Ю.М.** О возможности моделирования газодинамических процессов в выработанном пространстве выемочного участка / **Ю.М. Говорухин** // Проблемы и перспективы добычи и переработки угля в Кузбассе: Труды I региональной научно-практической конференции / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. д.т.н., проф. В.А. Сухорукова. – Новокузнецк, 2010. – С.86-89.

45. **Говорухин Ю.М.** К вопросу об управлении газовыделением выемочного участка / **Ю.М. Говорухин**, В.Г. Криволапов // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. статей / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2010. – С.396-399.

46. **Говорухин Ю.М.** О возможности использования вертикальных скважин большого диаметра в схемах вентиляции угольных шахт / **Ю.М. Говорухин** // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. статей / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2009. – С.291-295.

47. Криволапов В.Г. О возможности использования шахтного оборудования для прогнозирования газодинамических явлений при неравномерном подвигании очистного забоя / В.Г. Криволапов. **Ю.М. Говорухин** // Нетрадиционные и интенсивные технологии разработки месторождений полезных ископаемых: сб. науч. статей / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2008. – Вып. 1. – С.128-133.