

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
Криворожский национальный университет

На правах рукописи

Евстратенко Лилия Игоревна

УДК 622.82:622.454.2

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕНТИЛЯЦИИ РУДНИКОВ
КРИВБАССА С АЭРОАКТИВНЫМИ ЗОНАМИ ОБРУШЕНИЙ**

Специальность 05.26.01 – «Охрана труда»

Диссертация на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук,
доцент Ошмянский И.Б.

Кривой Рог- 2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	12
1.1. Анализ состояния проветривания рудников Кривбасса.....	12
1.2. Анализ зон обрушений вызванных технологическими процессами.....	16
1.2.1. Виды зон обрушения на рудниках Кривбасса.....	16
1.2.2. Основные параметры пористой среды обрушенных зон.....	23
1.2.3. Анализ режимов фильтрации в зонах обрушения.....	30
1.3. Состояние исследований вентиляционных режимов рудников с аэроактивными зонами обрушений.....	37
1.4. Выводы.....	42
2. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В АЭРОАКТИВНЫХ ЗОНАХ ОБРУШЕНИЙ РУДНИКОВ КРИВБАССА	45
2.1. Обоснование физической модели фильтрационных течений в пористых средах зон обрушения горных пород.....	45
2.2. Математическая модель процесса фильтрации газа через зону обрушения горных пород с учетом изменения свойств реального газа и горных пород.....	48
2.3. Начальные и граничные условия при фильтрации газа через обрушенные зоны.....	59
2.4. Анализ теоретических решений и получение аналитических приближений.....	62
2.5. Прогнозирование возможности поступления токсичных и вредных примесей с утечками воздуха в подземные выработки через зону обрушения.....	66
2.5.1 Перенос вредных примесей фильтрационными утечками атмосферного воздуха в обрушенных зонах горных пород.....	66
2.5.2 Влияние сорбционной способности горных пород на перенос газа в обрушенной зоне.....	70
2.6. Выводы.....	73
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗОВ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ОБРУШЕННЫХ ЗОН	75
3.1. Параметры определяющие режим фильтрации в обрушенных зонах.....	75
3.2. Основные параметры пористой среды обрушенных зон влияющие на режим фильтрации газа.....	80

3.3. Методика экспериментальных исследований.....	86
3.4. Исследование режима движения воздуха через пористую среду в зависимости от ее гранулометрического состава.....	89
3.5. Исследование влияния литологического состава горных пород на проницаемость пористой среды обрушенных зон и режимы фильтрации воздуха в них.....	100
3.6. Исследование параметров фильтрации воздуха в пористой среде при отклонении от линейного закона движения.....	112
3.7. Экспериментальные исследования аэродинамических параметров фильтрационного движения через обрушенные зоны.....	120
3.8. Выводы.....	122
4. РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕНТИЛЯЦИИ РУДНИКОВ С АЭРОАКТИВНЫМИ ЗОНАМИ ОБРУШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ КРИВБАССА.....	124
4.1. Способ управления фильтрационными режимами в зоне обрушений путем смещения зоны нулевой депрессии в сети горных выработок.....	124
4.2. Определение основных аэродинамических параметров вентиляционных систем рудников с аэроактивными зонами обрушения..	136
4.3. Снижение проницаемости зон обрушения горных пород путем заполнения порового пространства пород воздухо- и водо- непроницаемым составом.....	144
4.4. Выводы.....	149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	151
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	166
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	167

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

K – коэффициент проницаемости горных пород, с^2 ;

k_p – коэффициент пористости горных пород;

$K_{ан}$ – коэффициентом анизотропности;

v_ϕ – скорость фильтрации, м/с ;

u – осредненная скорость в поровых каналах, м/с ;

P – давление, Па ;

P_a – атмосферное (барометрическое) давление, Па ;

ΔP – потеря давления на участке, Н/м^2 ;

μ – динамическая вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

Q – расход, $\text{м}^3/\text{с}$;

F – площадь, м^2 ;

ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$;

ρ – плотность, кг/м^3 ;

γ – удельный вес, Н/м^3 ;

D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$;

G_ϕ – массовый расход воздуха при фильтрации, кг/с ;

S_ϕ – площадь фильтрации на участке прямолинейно-параллельного потока, м^2 ;

$d_{э\phi}$ – эквивалентный диаметр канала пористой среды, м ;

n – показатель режима движения воздуха;

V_m – объем горной массы в массиве, м^3 ;

V_p – объем горной массы после обрушения в разрыхленном виде, м^3 ;

V_n – объем пустот в разрыхленной горной массе, м^3 ;

ω – влажность горных пород;

k_ω – коэффициент влажности горных пород, кг/м^3 ;

m – пористость породы;

K_T – параметр турбулентности пористой среды;

ВГП – вентиляторы головного проветривания.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Современные железорудные шахты Украины, обрабатывающие мощные рудные залежи, характеризуются высокой интенсивностью и концентрацией горных работ с применением массовых взрывов при отбойке полезного ископаемого.

Применение высокопроизводительных систем разработки с обрушением руды и покрывающих пород при добыче полезных ископаемых из мощных месторождений зачастую приводит к образованию зон обрушения обладающих высокой газопроницаемостью, что приводит к аэродинамической связи горных выработок с поверхностью.

Образование аэродинамической связи горных выработок с земной поверхностью через зону обрушения, оказывает существенное влияние на вентиляционную систему. Утечка рудничного воздуха или приток проявляются в том, что они уменьшают количество доходящего до забоев свежего воздуха и нарушают планируемый воздухообмен в подземных горных участках, блоках, камерах и отдельных забоях. Кроме того, анализ случаев и причин проникновения вредных газов в подземные выработки, выполненный в различных районах многими исследователями, свидетельствует о том, что одной из причин проникновения токсичных газов в шахту является наличие активной аэродинамической связи горных выработок с поверхностью через зону обрушений. При этом концентрация вредных газов в подземных выработках может превышать предельно допустимые значения длительное время.

Изучению явлений, связанных с фильтрационными процессами, протекающими в пористых средах обрушенных зон, посвящено значительное количество исследований. Однако до настоящего времени не разработаны достаточно эффективные методы учета влияния аэродинамически активных зон обрушений на систему вентиляции рудников.

В связи с изложенным, изучение процесса фильтрации воздуха через аэродинамически активные зоны обрушений рудников Кривбасса, с учетом

свойств пористой среды и режима движения газа в ней, позволяющих прогнозировать величину утечек воздуха и динамику токсичных примесей в обрушенных зонах, разрабатывать методы и средства, повышающие эффективность проветривания горных выработок железорудных шахт является актуальной задачей.

Решению этой актуальной задачи и посвящается диссертационная работа.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Исследования по теме диссертации выполнены в соответствии с Государственной целевой программой улучшения состояния безопасности и гигиены труда на 2012–2016 гг. (постановление Кабинета Министров Украины №889-р от 31.08.2011 г.) и планами научно-исследовательских работ Криворожского национального университета по теме “Разработка руководства по дистанционному отбору проб воздуха при проведении горных выработок” (№ госрегистрации 0114U003899), при выполнении которой автор принимал участие как исполнитель.

Цель и задачи исследований

Целью работы является повышение эффективности проветривания железорудных шахт путем установления закономерностей движения воздуха через аэродинамически активные зоны обрушения рудников Кривбасса и разработки способов и средств управления фильтрационными процессами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ причин недостаточной эффективности проветривания шахт Кривбасса;
- установить факторы, влияющие на характер протекания фильтрационных процессов в зонах обрушений;
- выполнить исследования процессов взаимодействия фильтрационных потоков с поровым пространством горных пород и определить основные аэродинамические параметры обрушенных зон;

- исследовать влияние на режимы фильтрации газов гранулометрического состава и свойств пористой среды;

- разработать способы и средства управления фильтрационными процессами протекающими в аэродинамически активных обрушенных зонах.

Объект исследования – аэродинамически активные обрушенные зоны железорудных шахт Кривбасса.

Предмет исследования – процессы фильтрации воздуха в аэродинамически активных зонах обрушений.

Методы исследования. Для достижения поставленных задач в работе использованы аналитический и экспериментальный методы - для исследования фильтрационных процессов протекающих в обрушенных зонах; методы математического моделирования - для разработки моделей процесса фильтрации воздуха в аэродинамически активных зонах обрушения горных пород; методы физического моделирования - для исследования фильтрационных характеристик пористой среды обрушенных зон на модели; методы математической статистики – при обработке экспериментальных результатов и оценке достоверности полученных математических моделей; опытно-промышленную апробацию - для проверки разработанных способов и средств управления фильтрационными процессами, протекающими в аэродинамически активных обрушенных зонах.

Основные научные положения и результаты, их новизна.

Научные положения:

1. Основной причиной изменения сопротивления пористой среды аэродинамически активной зоны обрушения является фильтрация воды атмосферных осадков с содержанием мелких взвешенных в ней частиц через поверхностный слой обрушенной зоны, которые, проникая в поровое пространство более крупной горной породы, вызывают процесс коагуляции пористой среды.

2. Зависимость аэродинамического сопротивления пористой среды зоны обрушения от ее влажности носит нелинейный экстремальный характер, причем, незначительное увлажнение пористой среды (вплоть до 3%) приводит к снижению сопротивления, что связано со снижением величины коэффициента

трения воздуха о поверхность частиц породы, а при дальнейшем увеличении влажности - сопротивление вначале стабилизируется, а затем резко возрастает, что объясняется перекрытием части поровых каналов водой или их сужением.

Научные результаты и их новизна.

1. Установлены закономерности изменения сопротивления пористой среды аэродинамически активной зоны обрушения, в зависимости от влажности вызванной атмосферными осадками и фильтрацией воды с содержанием мелких взвешенных в ней частиц через поверхностный слой обрушенной зоны.

2. Получены количественные характеристики процесса фильтрации газа через пористую среду с учетом влияния литологического состава горных пород на проницаемость аэродинамически активных зон обрушения и режимы фильтрации воздуха в них, позволяющие прогнозировать основные аэродинамические параметры зоны обрушения.

3. Усовершенствована математическая модель формализованного описания процесса фильтрации воздуха в аэродинамически активных зонах обрушения горных пород, которая в отличие от известных учитывает влияние сорбционной способности горных пород на перенос фильтрационными утечками воздуха вредных газообразных примесей в обрушенной зоне.

4. Получил дальнейшее развитие метод определения режима движения воздуха в вентиляционных системах рудников с учетом изменения основных аэродинамических параметров зоны обрушения, позволяющий уточнять закон сопротивления в сети, более надежно определять характеристики сетей рудников, режимы работы вентиляторов главного проветривания (ВГП) и показатели эффективности их эксплуатации.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы подтверждается: корректностью постановки и решения задач; применением современных методов теоретического анализа с учетом общепринятых допущений; проведением экспериментальных исследований с использованием аттестованного оборудования и средств контроля; согласованностью результатов теоретических и экспериментальных исследований; положи-

тельными результатами опытно-промышленной проверки разработанных способов и средств в шахтных условиях.

Практическое значение полученных результатов заключается в том, что они использованы для создания новых методов и способов управления процессом фильтрации утечек воздуха через зоны обрушений.

Разработан метод определения общего показателя режима движения воздуха в вентиляционных системах рудников, позволяющий учитывать процесс фильтрации воздуха через зону обрушения и значительно повысить достоверность и надежность проектных вентиляционных параметров за счет учета влияния аэродинамических параметров зоны обрушения, как одной из ветвей вентиляционных сетей рудников с аэродинамически активными обрушениями;

Разработан метод снижения интенсивности процесса фильтрации воздуха в зоне обрушения обеспечивающий создание «нулевой» зоны перепада давлений между горными выработками и поверхностью за счет определения режимов работы ВГП, при которых обеспеченность свежим воздухом подземных потребителей будет наиболее близка к расчётной.

Разработан способ снижения проницаемости зоны обрушения горных пород, отличающийся тем, что для снижения проницаемости горных пород в зону обрушения вводится специальный раствор, при воздействии которого происходит процесс адсорбционного взаимодействия частиц раствора со скелетом породы, коагуляция и структурообразование соединений раствора и «застревание» частиц и агрегатов в порах породы.

Выполненные в диссертационной работе теоретические и экспериментальные исследования внедрены при разработке «Руководства по комплексному обследованию вентиляции шахт, других подземных объектов и повышению эффективности проветривания» (НАОП-2014).

Личный вклад соискателя заключается в формулировании цели и постановке задач исследований, анализе причин неудовлетворительного проветривания горных выработок примыкающих к обрушенной зоне, в исследовании фильтрационных процессов на моделях, в разработке новых способов и средств

управления процессом фильтрации в аэродинамически активных обрушенных зонах.

Личный вклад диссертанта в работах, опубликованных в соавторстве состоит в следующем: [1] исследована структура воздушного потока в негерметичных горных выработках, примыкающих к обрушенному пространству; [2] - предложены решения по предотвращению неконтролируемых подсосов воздуха через обрушенное пространство; [3] – проведены теоретические исследования динамики фильтрационных потоков через пористую среду аэродинамически активных зон обрушения при различных физических условиях; [4] - предложены пути повышения эффективности функционирования вентиляционных систем при добыче руды из глубоких горнорудных шахт; [5] - установлены режимы фильтрации воздуха в пористой среде обрушенных зон рудников Кривбасса, [6, 7] - разработана математическая модель управления утечками воздуха через зону обрушения с использованием методов планирования промышленных экспериментов; [8] - предложена схема проветривания и устройство для ее осуществления, [9] – выполнены расчеты целесообразности применения теплообразующего оборудования, [10] – выполнен анализ результатов комплексного обследования вентиляционных систем шахт и других подземных объектов.

Апробация результатов диссертации.

Основные положения диссертационной работы докладывались на международных конференциях «Современные технологии и экологическая безопасность использования гранулированных и эмульсионных взрывчатых веществ» (Свалява – Кременчуг, 2015) и «Форум горняков» (Днепропетровск, 2012), на III Всеукраинской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наукова весна – 2012» (Днепропетровск, 2012), на техническом совещании при главном инженере ПАО „КЖРК” (г. Кривой Рог, 2014), научно-технических семинарах кафедры рудничной аэрологии и охраны труда Криворожского национального университета и кафедры аэрологии и охраны труда Национального горного университета.

Публикации. По материалам исследований опубликовано 13 научных работ, в том числе: 2 монографии, 5 статей в специализированных изданиях, утвержденных ВАК Украины, 2 статьи в международных изданиях, которые входят в международные научно-метрические базы, 3 статьи - материалы и тезисы докладов на конференциях, 1 - нормативный акт по охране труда.

Работа выполнена в Криворожском национальном университете и на железорудных шахтах Украины.

1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Анализ состояния проветривания рудников Кривбасса

Применение в настоящее время высокопроизводительной технологии добычи полезных ископаемых из мощных месторождений подземным способом с использованием систем разработки с обрушением руды и покрывающих пород, а также создание принципиально новых технологических схем ведения горных работ при комплексной открыто–подземной разработке основной части месторождения и доработке маломощных и забалансовых частей оставленных целиков, при которых достигается полное совмещение в пределах одного выемочного поля открытых и подземных работ приводит к образованию аэроактивных зон обрушения [11 - 14], оказывающих существенное влияние на проветривание горных выработок, как в нормальном режиме вентиляции, так и в аварийном [15]. Фильтрация воздуха через зоны обрушения приводит к значительным непроизводительным его потерям, в результате чего уменьшается количество свежего воздуха доходящего до забоев и нарушается планируемый воздухообмен в подземных горных участках, блоках, камерах и отдельных забоях. Кроме того, при массовом обрушении железной руды в камерах используется большое количество взрывчатых веществ (достигающее несколько десятков и сотен тонн) взрываемых одновременно. Каждый взрыв приводит к образованию значительного количества газов, представляющих опасность для здоровья и жизни горняков. Для борьбы с ними производят регламентированное по времени проветривание. После чего проводятся дальнейшие работы по выдаче отбитой руды на поверхность. Несмотря на довольно продолжительное проветривание, периодически, через значительное время после начала проветривания, наблюдаются случаи превышения ПДК, установленных для взрывных газов, приводящие к тяжелым отравлениям горнорабочих.

Комплексное обследование вентиляционных систем глубоких горнорудных шахт Кривбасса, проведенных Криворожским ВГСО свидетельствует о том, что общая величина непроизводительных потерь воздуха через аэродинамически активные зоны обрушений, утечки с поверхности на ГВУ и через надшахтные строения вентиляционных стволов по результатам воздушно-депресссионных съемок в отдельные периоды работы в среднем составляет около 50% от общей производительности ГВУ, среди которых с поверхности на всасывающих ГВУ – 15,3 %; с поверхности через аэродинамически активные зоны обрушения – 12,2%; общешахтные через вентиляционные сооружения ШВС – 19,4%; в сетях очистных блоков – 3,4% [1].

В табл. 1.1 приведены основные вентиляционные параметры глубоких горнорудных шахт Кривбасса и Запорожского железорудного комбината (ЗЖРК) по результатам комплексного обследования их вентиляционных систем на протяжении 2009–2012 гг. [4].

Температура воздуха в очистных, буровых, нарезных и проходческих тупиковых выработках шахт Кривбасса при разработке основных рабочих горизонтов от 1045 до 1500 м находится в пределах 24,3–25,8 °С, на шахте «Эксплуатационная» ЗЖРК в этажах 740–840 и 840–940 м соответственно 25,7–28,9 °С.

Комплексное обследование вентиляционных систем шахт позволяет определить степень эффективности использования производительности ГВУ, которые составляют от 0,32 до 0,72, статические коэффициенты полезного действия (КПД) ГВУ типоразмеров ВЦ–5 и ВЦ–5С находится в диапазоне 0,37–0,47, ВЦД–3,3 и ВЦД–31,5 – в пределах 0,25–0,64; ВЦД–2,2 – 0,44...0,54, т.е режимы работы всех ГВУ этих типоразмеров находятся за границами зоны их экономического использования. Только ГВУ с вентилятором типа ВРЦД–4,5 работает с КПД=0,7. [1]

Основными причинами низких показателей режимов работы ГВУ являются большие непроизводительные утечки воздуха через зоны обрушения шахт и на ГВУ, что приводит к значительному снижению полных аэродинамических

сопротивлений шахтных сетей отдельных вентиляционных участков на этих шахтах $R_{вс} = (3,6 - 9,4) \cdot 10^{-3} \text{ Нс}^2/\text{м}^8$. Большинство ГВУ с вентиляторами типов ВЦ-5 эксплуатируются на шахтах больше 50 лет и не имеют резервов по производительности и давления даже при полном раскрытии лопаток спрямляющих аппаратов.

Таблица 1.1 – Основные вентиляционные параметры рудников Кривбасса по результатам комплексного обследования их вентиляционных систем

Шахта	Глубина рабочих горизонтов, м	Количество воздуха, м ³ /с			Тип ГВУ	Депрессия, даПа	Аэродинамическое сопротивление ШВС, Нс ² /м ⁸	Непродуктивные утечки воздуха в ШВС, м ³ /с	Степень использования производительности ГВУ	Статический КПД вентиляторов
		Поступающее в шахту	Выдаваемое из шахты	Производительность ГВУ						
им. Артема №1 ПАО "Арселор Кривой Рог"	1045 1135 1225	264,6	286,6	339,2	ВРЦД- 4,5	443,9	0,0039	121,3	0,64	0,7
ш. «Родина» КЖРК	1315 1390	233,1	174,9 81,9	181,7 135,2	ВЦД- 31,5 ВЦД-3,3	245,9 136,5	0,0075 0,0075	200,7	0,37	0,64 0,24
ш. «Октябрьская» КЖРК	1340 1415	190,6	83,7 191,6	129,2 214,0	ВЦ-5С ВЦ-5	135,5 252,0	0,0081 0,0045	183,7	0,46	0,40 0,47
ш. им. Фрунзе "Евраз Сухая Балка"	1285 1360	174,4	92,8 108,2	108,5 126,6	ВЦД-2,2 ВЦД-2,2	238,3 230,3	0,0203 0,0144	104,4	0,56	0,44 0,54
ш. «Юбилейная» "Евраз Сухая Балка"	1285 1360	218,5	156,4 99,6	166,4 107,1	ВЦ-5 ВЦД- 31,5	222,6 166,4	0,008 0,0145	98,3	0,64	0,49 0,39
ш. «Гвардейская» "Евраз Сухая Балка"	1272 1432	127,0	182,6	217,3	ВЦ-5	218,8	0,0046	148	0,32	0,39
ш. им. Ленина КЖРК'	1350 1425	242,1	227,5 123,3	242,2 129,1	ВЦД- 31,5 ВЦ-5С	211,2 156,9	0,0036 0,0094	170,9	0,54	0,42 0,37
ш. «Эксплуатац ионная» ЗЖРК	740 840 940	681,0	213,4 259,4 183,0	229,9 268,6 193,3	ВЦД-3,3 ВЦД-3,3 ВЦД- 31,5	307,0 253,6 234,9	0,0058 0,0035 0,0063	196,8	0,72	0,55 0,54 0,37

Динамика утечек воздуха всех категорий и их суммарных значений за исследуемый период, отнесенных к производительности ГВУ, дает основание для вывода о постоянном снижении этих показателей. Одновременно с этим вели-

чины нормативных утечек воздуха значительно ниже их фактических значений на рудниках бассейна. При допустимой суммарной величине утечек воздуха для рудников Кривбасса 25% от производительности ГВУ величина сверхнормативных утечек воздуха в 2009 – 2012 гг. составила 17,9% от производительности ГВУ, или $967 \text{ м}^3/\text{с}$, что является одной из основных причин недостаточной обеспеченности горных работ свежим воздухом в настоящее время.

Большие сверхнормативные утечки воздуха приводят к недостаточной эффективности использования производительности действующих ВГП.

Основными способами повышения эффективности функционирования вентиляционных систем при дальнейшем понижении глубины разработки являются следующие:

- снижение до необходимо возможных по техническим условиям величин утечек воздуха через зоны обрушения, утечек на ГВУ, утечек во внутришахтной сети;

- проведение реконструкции вентиляционных систем глубоких горнорудных шахт, без которой невозможно обеспечить необходимые безопасные и санитарно-гигиенические условия труда, которая предусматривает: замену морально и физически устаревших ГВУ на действующих шахтах на высоконапорные вентиляторы; возможность использования подземных вентиляторных установок, работающих последовательно с ГВУ; переход на некоторых шахтах на нагнетательно-всасывающий способ проветривания, позволяющий обеспечить подачу необходимого расчетного количества воздуха и преодолеть значительные депрессии вентиляционных систем;

- совершенствование проектных решений по вентиляции более глубоких горизонтов с использованием существующих методов и способов проектирования.

Выполненные исследования по проектированию проветривания глубоких шахт свидетельствуют, что с учетом теплового фактора для их вентиляции необходимо подавать в шахту $160\text{--}180 \text{ м}^3/\text{с}$ свежего воздуха на 1 млн. т выдаваемой горной массы [4].

Одним из эффективных способов борьбы с утечками воздуха через обрушенные пространства, является заполнение их вскрышными породами карьеров или взрывание участков их нерабочих бортов. Опыт засыпки зон обрушения ряда рудников Кривбасса отвальными породами ГОКов (рудники им. Коминтерна, им. Ильича, “Сухая Балка”) показал, что на таких рудниках утечки воздуха через обрушения практически отсутствуют [14].

1.2 Анализ зон обрушений вызванных технологическими процессами.

1.2.1 Виды зон обрушения на рудниках Кривбасса.

Современные железорудные шахты Украины, отрабатывающие мощные рудные залежи, характеризуются высокой интенсивностью и концентрацией горных работ с применением массовых взрывов при отбойке полезного ископаемого.

Актуальность проблемы сдвижения горных пород при подземной разработке месторождений полезных ископаемых сохраняется на протяжении всей истории развития горного дела и обусловлена опасностью разрушения от воздействия процесса сдвижения, как сооружений горных предприятий, так и окружающих промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений, а также природных объектов, попадающих в зону влияния подземных разработок.

Наряду с разрушениями подрабатываемых объектов, процесс сдвижения нередко создает опасность и для самих горных работ, в частности, образование зон обрушения и водопрводящих трещин при выемке полезного ископаемого под реками, озерами и водоемами или при наличии карстов, обводненных пород, пльвунов и т. п. может привести к прорыву вод, затоплению и загазированию горных выработок.

Просчеты и необоснованность решений проблем, вызванных влиянием подземных разработок, оборачивается, как правило, экономическим ущербом, а нередко и человеческими жертвами.

Проведение выработок и образование пустот в разрабатываемых залежах и вмещающих породах нарушает существовавшее в них равновесие, вызывая развитие сдвижений и деформаций. В зависимости от размеров выработанного пространства процесс сдвижения может достигнуть земной поверхности. Из практики известно, что изменения напряженного состояния и сдвижения массива горных пород и земной поверхности проявляются на значительных расстояниях, превышающих, иногда, в несколько раз размеры разрабатываемых участков [14, 16]. Основной особенностью развития процесса сдвижения является обязательное образование зоны обрушения (рис. 1.1) [17], обусловленной параметрами рудных тел, применяемой технологией разработки и свойствами вмещающих пород.

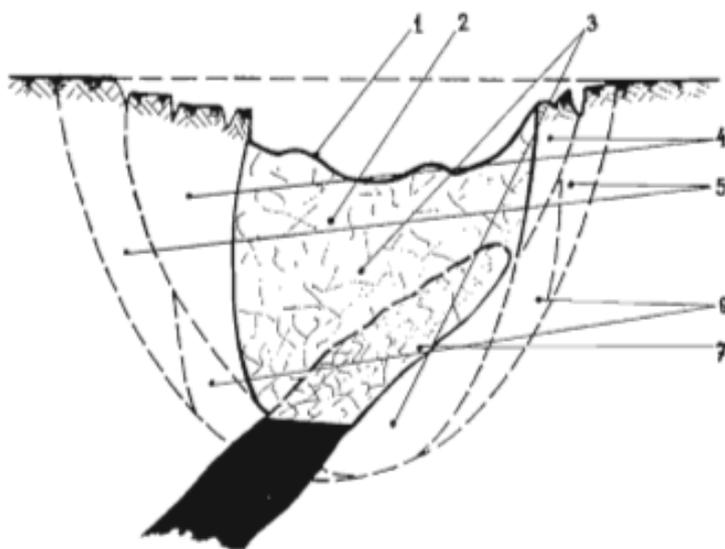


Рисунок 1.1 – Основные зоны сдвижения в массиве горных пород: 1 – провал; 2 – зона обрушения; 3 – зона разгрузки; 4 – зона трещин; 5 – зона плавных сдвижений; 6 – зона опорного давления; 7 – выработанное пространство.

В области влияния подземных разработок в массиве горных пород возникают основные виды деформаций – изгиб, сдвиг, растяжение и сжатие, которые в зависимости от интенсивности проявляются в виде плавных сдвижений без нарушения сплошности, с образованием трещин и в форме обрушения. Часть

земной поверхности, подвергаясь воздействию указанных форм проявления процесса сдвижения, называют мульдой сдвижения.

Характер процесса сдвижения и его параметры зависят в первую очередь от строения вмещающих пород. В скальном массиве различают слоистые и неслоистые породы. При разработке месторождения в слоистой толще вмещающих пород в почве и кровле выработанного пространства породы частично освобождаются от напряжений и оказываются в зоне разгрузки (см. рис. 1.1). Вес пород, зависших над выработанным пространством, воспринимается массивом горных пород по контуру выработок, где образуются зоны опорного давления. В зоне разгрузки возникают напряжения и деформации растяжения, а в зонах опорного давления – деформация сжатия по нормали к напластованию. После достижения выработкой предельного пролета прогибающиеся слои кровли обрушаются последовательно снизу вверх и при достаточных размерах выработанного пространства обрушение выходит на земную поверхность. Контур зоны обрушения на земной поверхности в большинстве случаев не выходит далеко за пределы проекции горных работ на горизонтальную плоскость. Если размеры выработанного пространства остаются небольшими по сравнению с глубиной разработки, то процесс обрушения может не достигнуть земной поверхности (рис. 1.2).

Над пологопадающими залежами малой и средней мощности зона обрушения обычно распространяется не более чем на их 3–4-кратную мощность, причем признаком обрушения считается нарушение первичной структуры пород, разделение их на не связанные друг с другом элементы – куски, блоки.

Краевая часть мульды сдвижения представляет собой зону плавных сдвижений, механизм образования которой связывается с отмеченным выше сжатием пород над целиками по нормали к напластованию. Часть веса слоев, зависших над выработкой, передается породам над целиками, создавая зоны опорного давления с повышенными сжимающими напряжениями. Оседания земной поверхности являются суммой сжимающих деформаций по нормали к напластованию и увеличиваются от границы мульды сдвижения к зоне трещин, поэтому земная поверхность и горные породы сдвигаются в форме изгиба.

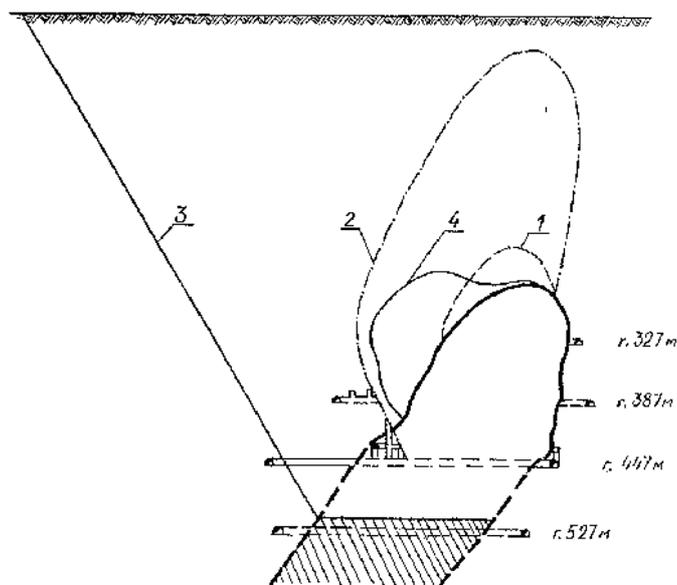


Рисунок 1.2 – Границы области сдвижения при отработке залежи «Южная–Магнетитовая»: 1 – при достигнутом состоянии выработанного пространства; 2 – после отработки выше гор. 447 м; 3 – после отработки этажа гор. 447–527 м; 4 – контур фактического обрушения налегающих пород.

При выемке залежи в неслоистых вмещающих породах над выработкой так же, как и при обрушении слоистого массива, по достижении предельного пролета образуется свод. Однако потеря равновесия и обрушение неслоистых пород кровли происходят в результате их отрыва и сдвига под воздействием силы тяжести по поверхностям ослабления массива, образуемым крупной и мелкой трещиноватостью и геологическими нарушениями.

Если зона обрушения не распространяется до земной поверхности, то интенсивность подвижек структурных блоков, образуемых трещиноватостью, постепенно уменьшается, и зона обрушения переходит в зону трещин. Такой же переход происходит и в горизонтальной плоскости в случае выхода обрушения на земную поверхность.

Исключительно актуальным этот вопрос является для железорудных месторождений, разрабатываемых подземным способом с применением камерных систем разработки, отличающихся значительными объемами образованных пустот, отделенных от дневной поверхности целиками или потолочинами, устой-

чивость которых от обрушения определяется расчетным путем или на основании опыта эксплуатации рудников с применением камерных систем разработки. Однако расчеты и опыт эксплуатации их на рудниках, не отличаются очень высокой точностью и надежностью при установлении на практике степени их устойчивости. При этом интенсификация добычи полезных ископаемых неизбежно ведет к увеличению масштабов образования подземных пустот и потенциальных зон обрушения. Так 13 июня 2010 года на шахте имени Орджоникидзе ОАО «ЦГОК» при выполнении плановых взрывных работ произошло обрушение грунта на территории (по поверхности) площадью 16 га, глубиной 10–80 м. В результате аварии в зону обрушения попал ствол шахты “Червоная”. Ствол и ГВУ были выведены из строя, что повлекло за собой естественный переход проветривания шахты на аварийный режим ее вентиляции, характеризующийся низкой эффективностью и надежностью (управляемостью).

После начала отработки запасов этажа 527/447 м остро стал вопрос безопасности ведения горных работ при наличии больших объемов пустот (на 1.04.2001 г – 7718.1 тыс. м³) в выработанном пространстве этажа 447/327 м. Доля вывалов и обрушений в общем объеме пустот составила порядка 17,5%.

Отработка залежи «Южная–Магнетитовая» по фронтально–бесцеликовой технологии, а, следовательно, увеличение размеров обнажения висячего бока, обусловила развитие процесса обрушения промежуточной толщи, первые признаки которого замечены свыше 10 лет назад.

С момента образования соответствующих конструктивных элементов очистной выемки работниками шахты и сотрудниками ГНИГРИ проводились регулярные наблюдения за состоянием обнажений выработанного пространства и целиков, а также за развитием самообрушения налегающих пород.

Для производства наблюдений и измерений были использованы станции глубинных реперов и станции звукометрического контроля в породах висячего бока на гор. 327 м, скважины, пробуренные с поверхности в выработанное пространство, оперативный звукометрический контроль в примыкающих к выработанному пространству выработках и в целиках.

Отработка этажа 527/447м в осях (-23) – (+30) при условии охраны объектов, находящихся в южном торце залежи, привело к образованию выработанного пространства со средними размерами по простиранию 500 м, а по падению – 307 м. Эквивалентный пролет обнажения висячего бока при этом достигнет 262 м, высота области сдвижения – 411 м. После отработки этажа 527/447 м ожидаемая высота области сдвижения в 1,7 раза превышает мощность толщи покрывающих залежь пород. Вследствие этого на поверхность выйдут воронки обрушения (см. рис. 1.2).

Ведение горных работ в подземных условиях сопряжено с безусловным нарушением равновесия в массиве горных пород, которое в зависимости от параметров и технологии разработки может либо локализоваться внутри массива горных пород, либо проявиться на земной поверхности в виде провалов, террас, трещин и зон плавных деформаций как это показано на рис. 1.3.



Рисунок 1.3 – Нарушение земной поверхности при образовании зон обрушений.

Все зоны обрушения можно разделить на два основных вида:

- зоны обрушения локализованные внутри массива горных пород;
- зоны обрушения, распространяющиеся до земной поверхности.

При производстве массовых взрывов, продукты взрывания под воздействием высокого давления попадают не только в зону обрушения, пористая среда которой характеризуется не связанными друг с другом элементами, но и в трещиноватую зону, в которой образование трещин сопряжено с основными видами деформаций (изгиб, сдвиг, растяжение и сжатие). Таким образом, кроме процесса фильтрации, возможен процесс движения флюидов в трещинах, который приближенно можно сопоставить с движением в трубах, т.е. флюид движется, как поток в трубе с различными формами.

В связи с изменением пространственного распределения областей сжатия и растяжения горных пород в зоне сдвижения происходит миграция флюидов. При наличии растягивающих деформаций увеличивается пористость и проницаемость пород, уменьшается давление флюидов. Соответственно в этой зоне происходит накопление флюидов и их миграция в сторону участков с пониженным давлением. При наличии зон сжимающих деформаций происходит, наоборот, уменьшение пористости пород и снижение интенсивности фильтрации флюидов, увеличение давления воды и газа.

Границы зон сжатия и растяжения, соответственно и границы зон обрушения, при выполнении горных работ не являются постоянными и перемещаются во времени и пространстве. Однако при наличии в зоне сдвижения нескольких зон сжатия и растяжения возможно образование зон с повышенным давлением газов в пористой среде и при изменении напряжённо-деформированного состояния массива, а также наличия аэродинамической связи с горными выработками, возможно внезапное выделение газа на рабочих местах. Если процесс обрушения достигает земной поверхности, то существует вероятность выхода продуктов взрыва в атмосферу.

Установлено, что основными параметрами обрушенной зоны массива, влияющими на вероятность возникновения аварии или инцидента по газодинамическим условиям, является его объём в зоне сдвижения горного массива, количество продуктов взрыва в обрушенном пространстве, фильтрационные свойства пород в пределах обрушений и пространственно–временное распределение продуктов взрыва.

При исследовании выделены следующие типы зон обрушения:

- с аэродинамической связью с поверхностью;
- с аэродинамической связью с горными выработками;
- имеющие аэродинамическую связь, как с горными выработками, так и с поверхностью.

Последние еще принято называть аэродинамически активные или аэроактивные зоны обрушения [14].

Пористая среда обрушенных зон горного массива весьма неоднородна и представлена, как правило, совокупностью несвязанных друг с другом элементов разнообразной формы и различных размеров (частицы, куски, блоки). Поэтому в пределах зоны обрушений фильтрационные параметры (пористость и проницаемость) горных пород отличаются от соответствующих параметров в нетронутом массиве вне зоны влияния горных работ.

В зоне сдвижения при наличии расслоения пород по контактам, а также в зонах обрушения и трещинообразования эффективная пористость может существенно превышать общую пористость в нетронутом массиве. Поэтому исследование зон обрушения и газодинамических процессов должны проводиться комплексно, с учётом динамики флюидов и формирования порового пространства в зонах обрушения.

1.2.2 Основные параметры пористой среды обрушенных зон.

К динамическим характеристикам обрушенной зоны относятся скорость фильтрации и дебит газа при изменении проницаемости породного массива под

влиянием технологических (массовые взрывы) и геомеханических (обрушения горных пород) процессов.

Определяющим фактором в процессе фильтрации является структура пористой среды.

Пористая среда – это множество твердых частиц, тесно прилегающих друг к другу, сцементированных или несцементированных, пространство между которыми (поры, трещины) может быть заполнено флюидом (жидкостью или газом) [18, 19].

При движении флюида в пористой среде возникает силовое взаимодействие между твердым скелетом породы и прилегающими к нему частицами флюида. Если это взаимодействие не учитывать, то пористую среду можно рассматривать как границы области, в которой движется жидкость [18] и тогда свойства пористой среды можно описать некоторыми средними геометрическими характеристиками.

Детальные исследования структуры пористой среды необрушенного массива горных пород представлены в работах [20 – 23], в которых приведена классификация структурных моделей, на основе которой установлены аналитические связи между различными свойствами горных пород (пористость, проницаемость, трещиноватость, анизотропность и др.). Однако структура порового пространства обрушенного массива горных пород существенно отличается от структуры его пористой среды до обрушения. В пределах зон обрушения, которые являются частью зоны сдвижения, под влиянием техногенных процессов происходит изменение природного состояния пород, нарушение первичной структуры пород, разделение их на не связанные друг с другом элементы (куски, блоки), в результате чего возникают явления оказывающие существенное влияние, как на работу горного предприятия, так и на окружающую среду. В этих зонах параметры пористости и проницаемости пород отличаются от соответствующих параметров в горном массиве вне зоны влияния горных работ. Изменяются характер и размер пустот, уменьшается плотность пористой среды обрушенного пространства, изменяется гранулометрический состав пород,

появляется трещиноватая зона на границе между обрушенным и необрушенным массивами и т.д. Кроме того, при прогибе отдельных породных плит в верхней части возникают сжимающие горизонтальные напряжения и деформации, а в нижней – растягивающие, что приводит к изменению анизотропности горных пород.

Важнейшей характеристикой пористой среды является ее пористость, определяемая наличием в ней пор, трещин (пустот). Суммарный объем всех пустот в породе называют полной (или общей) пористостью. Отношение суммарного объема пустот в массиве V_{II} ко всему объему массива V называется коэффициентом пористости

$$K_{II} = \frac{V_{II}}{V_m} \quad (1.1)$$

Равенство (1.1) определяет среднюю пористость рассматриваемого элемента. Если свойства этого элемента изменяются от точки к точке, то можно ввести понятие локальной пористости.

Некоторая часть пор, сообщающихся между собой, образует непрерывную среду, что является одним из основных условий движения флюида в рассматриваемой системе. Поэтому для изучения процессов фильтрации используют эффективную пористость, которая учитывает только сообщающиеся между собой поры. Она всегда меньше или равна общей пористости.

Пористость пород весьма разнообразна и зависит от множества природных и техногенных факторов. Пористость магматических и метаморфических пород весьма мала (0,8–1,2 %) [24]. Осадочные породы имеют большую пористость.

Наибольшую общую пористость имеют глины, пески, песчаники, но у глины поры в основном закрытые, то есть не сообщающиеся друг с другом.

Обломочные породы весьма пористы. С ростом глубины пористость обломочных пород уменьшается.

Пористость зависит от формы и размеров зерен, степени их окатанности, уплотнения, цементирования обломков и зерен.

Коэффициент пористости обрушенных зон определяется коэффициентом разрыхления горной массы k_p в результате обрушения, который равен отношению [25]

$$k_p = \frac{V_p}{V_m}, \quad (1.2)$$

где V_m и V_p – соответственно, объемы горной массы в массиве и после обрушения в разрыхленном виде, м^3 .

Объем пустот в разрыхленной горной массе определится как разность между V_p и V_m , т.е.

$$V_n = V_p - V_m \quad (1.3)$$

Так как пористость магматических и метаморфических пород в нетронутом массиве незначительна, то ее величиной можно пренебречь без ущерба для точности.

Коэффициент пористости одинаков для геометрически подобных сред и он не характеризует размеры пор и структуру порового пространства. Поэтому для описания пористой среды необходимо вводить также некоторый характерный размер порового пространства. Существуют различные способы определения этого размера. Естественно, например, за характерный размер принять некоторый средний размер порового канала d или отдельного зерна пористого скелета [18].

Простейшим геометрическим параметром, характеризующим размер порового пространства, является эквивалентный диаметр каналов кусковатой среды, который зависит от свободного объема пористой среды [26 – 28]. Для условий Кривбасса, при $V_n = 0,3 \dots 0,38 \text{ м}^3$, можно принимать равным $d_s = 0,002$ [26].

Другой весьма важной характеристикой пористой среды, определяющей процесс фильтрации в ней, является ее проницаемость.

Известны следующие виды проницаемости [29]: абсолютная, эффективная и относительная.

Абсолютная (физическая) проницаемость представляет собой проницаемость пористой породы для единственной фазы, которая физически и химически инертна к породе.

Эффективная (фазовая) проницаемость – это проницаемость при наличии в породе более одной фазы. Как известно, поры могут вмещать как жидкость, так и газ. Проницаемость любой из этих фаз не будет равна абсолютной проницаемости.

Относительная проницаемость это отношение эффективной проницаемости к абсолютной.

Для характеристики физических свойств пород используется абсолютная проницаемость. Для ее оценки обычно используется воздух или газ, так как установлено, что при движении жидкостей в пористой среде на ее проницаемость влияют физико–химические свойства жидкостей.

Оценка проницаемости горных пород производится на основании линейного закона фильтрации Дарси [29 – 35], согласно которому скорость фильтрации жидкости в пористой среде пропорциональна градиенту давления и обратно пропорциональна динамической вязкости:

$$v = \frac{Q}{F} = \frac{K}{\mu} \frac{\Delta P}{L}, \quad (1.5)$$

где v – скорость линейной фильтрации, м/с; Q – объемный расход жидкости в единицу времени, м³/с; μ – коэффициент динамической вязкости флюида, Па·с; F – площадь фильтрации, м²; ΔP – перепад давления, Па; L – длина пористой среды, м.

В уравнении (1.5) способность породы пропускать жидкости и газы характеризуется коэффициентом пропорциональности K , который называют проницаемостью.

В настоящее время, на основании выполненных исследований [20, 33, 34, 36 – 40], определена проницаемость многих пород. Кроме того, предложен ряд классификаций горных пород по проницаемости. Наиболее простая классификация разработана Кобрановой В.Н. [38], предложившей разделить породы на проницаемые, полупроницаемые и практически непроницаемые.

К проницаемым отнесены грубообломочные осадочные породы, включая галечники и гравий, песчано–алеврито–глинистые и трещиноватые и кавернозно–трещинные карбонатные породы с коэффициентом проницаемости $K > 10^{-2}$ мкм². Сюда же относят и трещиноватые магматические и метаморфические породы, в которых наблюдаются проницаемые разности.

Полупористые породы ($10^{-4} < K < 10^{-2}$ мкм²) включают менее отсортированные глинистые пески, алевриты и песчаники с пористостью $< 10 - 15$ %, микротрещиноватые карбонатные породы с субкапиллярными каналами.

Практически непроницаемые породы включают глины, аргиллиты, глинистые сланцы, мергели с субкапиллярными каналами, а также сильно сцементированные алевролиты, известняки, песчаники и плотные магматические и метаморфические породы ($K < 10^{-4}$ мкм²). Некоторые специалисты [41] к трем описанным типам пород относят еще один. Это породы–экраны нефти и газа с коэффициентом проницаемости $K < 10^{-6}$ мкм². Они имеют такую низкую проницаемость, что служат ловушками для мигрирующих по геологическому разрезу скоплений нефти и газа. К ним относятся глины пластичные слабopесчаные, ангидрит, каменная соль, многолетнемерзлые породы.

На проницаемость песчано-алевролитовых пород существенно влияет размер обломков. Чем крупнее обломки, тем больше размер пор и выше проницаемость.

В породах, сложенных из неоднородных частиц проницаемость уменьшается по сравнению с породами, состоящих из относительно однородных по размеру обломков. Цемент осадочных горных пород оказывает большое влияние на проницаемость. Занимая пространство между частицами породы, цемент перекрывает пути фильтрационных потоков. Рассматривая влияние минераль-

ного состава глинистых цементов, необходимо отметить то, что наиболее резко уменьшает проницаемость монтмориллонит.

Экспериментально установлено то, что в осадочных породах содержащих 20–25 % карбонатного цемента, проницаемость близка к нулю [39].

С процессами фильтрации, происходящими в массиве горных пород сопряжено решение практических задач современной нефтяной и газовой технологии, в которых с точки зрения теории фильтрации рассматривают породу как твердый скелет пористой среды [31 – 34, 42, 43] значение которого, прежде всего, геометрическое. Этот скелет ограничивает ту область пространства, в которой движется жидкость. При этом предполагается, что свойства горного массива, находящегося в природном состоянии, постоянны. В условиях горных технологий добычи твердых полезных ископаемых такой подход неправомерен. Подземные горные работы связаны с нарушением равновесия в массиве горных пород, в результате чего свойства отдельных пород, слагающих горный массив, при его обрушении не оказывают существенного влияния на фильтрационные характеристики обрушенной зоны. В этих зонах параметры пористости и проницаемости пород отличаются от соответствующих параметров в горном массиве вне зоны влияния горных работ. Поэтому, несмотря на выполненные столь обширные экспериментальные исследования по определению проницаемости горных пород в необрушенном массиве, использовать результаты этих исследований для определения проницаемости пористой среды обрушенных зон не представляется возможным. Коэффициент проницаемости пористой среды обрушенных зон можно определить экспериментальным путем только для конкретных условий.

Твердые горные породы, кроме пористости и проницаемости, в отличие от других твердых тел, обладают анизотропностью, т.е. неравносвойственностью в разных направлениях нагрузки на них [37]. Особенно отмечается зависимость свойств горных пород от выбранного направления для осадочных пород. Причины этого следует искать в условиях осадконакопления при образовании слоистой текстуры. При этом свойства пород в параллельной плоскости

напластования или слоистости существенно отличаются от свойств в перпендикулярном направлении. Для метаморфических пород, подвергшихся влиянию какого-либо одностороннего горного давления и имеющих сланцеватую текстуру, анизотропность свойств вдоль поверхностей сланцеватости и поперек является частым явлением. Анизотропность физико-механических свойств горных пород определяется коэффициентом анизотропности K_{an} , который может быть подсчитан следующим образом [37]

$$K_{an} = \frac{A_{\parallel}}{A_{\perp}}, \quad (1.6)$$

где A_{\parallel} – показатель свойства породы вдоль слоистости или сланцеватости;

A_{\perp} – показатель того же свойства в перпендикулярном направлении нагрузки породы.

Анизотропность пористой среды обрушенных зон определяется не свойствами отдельных пород слагающих массив до момента обрушения, а характером обрушения. Более всего анизотропность пористой среды обрушения проявляется в зонах трещин (см. рис. 1.1), провала, плавных сдвигов и опорного давления.

1.2.3 Анализ режимов фильтрации в зонах обрушения.

Фильтрационные свойства горных пород, рассмотренные выше, оказывают существенное влияние на режимы движения в них флюида.

Обрушенный массив горных пород состоит из нескольких зон сдвижения, каждая из которых отличается фильтрационными свойствами. Если допустить, что разность давлений в зоне сдвижения постоянна, т.е. $\Delta P = const$, то режим фильтрации, при определенных значениях ΔP , для каждой зоны может существенно отличаться. Режим фильтрации в одних зонах может быть ламинарным и подчиняться закону Дарси, в других зонах могут быть отклонения от классиче-

ского закона фильтрации [44]. В том случае, когда реологические соотношения фильтрующегося флюида соответствуют закону Навье-Стокса (в нашем случае это газ), существует только одна причина отступления от классического закона Дарси – это высокая скорость движения флюида внутри пор, обуславливающая появление значительных по величине сил инерции [45]. Такие условия возникают при фильтрации в зоне трещин или при фильтрации в крупнокусковых пористых средах.

В связи с вышеуказанным, при высокой скорости флюида в гранулярной зоне обрушенного массива, фильтрация в большей мере протекает в соответствии с общим видом закона фильтрации несжимаемой жидкости в изотропной пористой среде. При этом потерю напора между какими-либо двумя поперечными сечениями можно рассматривать, если следовать вдоль какой-либо струйки, как сумму потерь напора на трение при движении в указанных трубках и сумму потерь от местных сопротивлений, имеющих место при выходе струйки из конца одной трубки и входе в другую. Это обстоятельство служит обоснованием двучленного закона фильтрации [34]

$$-\frac{dp}{ds} = \frac{\mu}{K}v + \frac{v}{|v|} \frac{b\gamma}{g}v^2, \quad (1.7)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

γ – удельный вес газа, Н/м³;

$|v|$ – действительная средняя скорость в трубке, м/с.

Первое слагаемое уравнения (1.7) дает потерю давления от прямого трения между жидкостью и пористой средой согласно линейному закону Дарси, второе, содержащее опытный коэффициент b , потерю давления, связанную с сужением и расширением элементарных струек потока, обтекающих беспорядочную систему твердых частиц, слагающих пористую среду, повороты струек и т. д. Примерные значения параметра b приведены в [46 – 48].

Второе слагаемое можно назвать потерей давления на «микроместные сопротивления» в отличие от термина «местные сопротивления», применяемого в

трубопроводной гидравлике и относящегося к деталям трубопроводной арматуры (задвижки, колена, переходы от одного сечения труб к другому), геометрические размеры которых несравненно больше размеров песчинок, обтекаемых фильтрационным потоком.

При малых скоростях v и соответственно малых числах Рейнольдса в (1.7) превалирует первый член, при больших – второй.

Оценим потерю напора h_T на трение и местную потерю напора h_m в пределах одной трубки, т. е. в пределах размеров примерно одной твердой частицы согласно обычным формулам гидравлики Дарси–Вейсбаха и Вейсбаха:

$$h_T = \lambda \frac{l v^2}{d 2g}, \quad h_m = \xi \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (1.8)$$

где λ и ξ – безразмерные коэффициенты, зависящие от числа Рейнольдса и формы частиц;

d – гидравлический диаметр трубки;

l – длина трубки;

По порядку величин, учитывая поправки на неравномерное распределение скоростей в сечении трубки при ламинарном режиме, можно принять

$$\lambda \approx \frac{64}{\text{Re}}, \quad \xi \approx 2 \quad (1.9)$$

Величина $\xi \approx 2$ взята с запасом, как для потери при истечении струи в затопленное пространство. В действительности $\xi < 2$. Учитывая, что в случае действия закона Дарси по Линдквисту [49] должно быть $\text{Re} < 4$, и полагая в пределах одного зерна $l/d \approx 1$, приходим к выводу, что местные потери по крайней мере на порядок меньше потерь трения. Отсюда следует, что поскольку трубки сообщаются между собой, то каждая струйка по выходе из данной трубки будет стремиться войти в ближайшую к ней трубку возможно максимального сече-

ния. При этом струйки, двигающиеся в порах наибольших размеров, продолжат свое движение также в дальнейших порах наибольших размеров и при распределении размеров пор, выдерживающемся в данной области грунта, установится распределение струек примерно одинаковых поперечных сечений.

Если в крайних сечениях потока заданы напоры H_1 и H_2 , то для всех струек будет одна и та же потеря напора, откуда следует, что при примерно одинаковой суммарной длине L струек средние скорости в струйках должны подчиняться условию $u/d^2 \approx \text{const}$ вытекающему из известной в гидравлике для ламинарного течения формулы Пуазейля

$$H_1 - H_2 \approx \frac{A \nu L}{d^2 g}, \quad (1.10)$$

где $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ – кинематический коэффициент вязкости; $A = 32$ для круглой трубки.

Отсюда следует, что средняя физическая скорость течения \bar{v} , связанная со скоростью фильтрации u отношением $\bar{v} = \frac{u}{K_{II}}$, соответствует течению в трубке некоторого среднего диаметра \bar{d} . Скорости же вдоль струек v связаны с \bar{v} согласно (1.10) формулой

$$\frac{v}{\bar{v}} = \frac{d^2}{\bar{d}^2}. \quad (1.11)$$

При ламинарном режиме в пределах трубки максимальная осевая скорость v_o примерно в 2 раза превосходит среднюю \bar{v} . Таким образом, максимальная физическая скорость жидкой частицы в фильтрационном потоке связана со средней физической скоростью соотношением

$$(v_o)_{\max} \approx 2 \frac{d_{\max}^2}{\bar{d}^2} \bar{v} \quad (1.12)$$

В зависимости от отношения d_{\max}/d максимальная физическая скорость жидкой частицы в фильтрационном потоке может значительно превосходить среднюю физическую скорость.

Неравномерное распределение скоростей вследствие неравномерного распределения размеров пор является физическим обоснованием так называемых диффузионных теорий фильтрации, которым за последнее время уделяется довольно много внимания [32, 50].

Следует отметить, что с повышением скорости фильтрации и нарушением закона Дарси коэффициент λ в (1.8) уменьшается и множитель $\lambda \frac{l}{d}$ становится сравнимым с ζ . В этом случае следует ожидать более равномерного распределения скоростей, нежели для движения, подчиняющегося закону Дарси.

Так же как и для гранулярных пористых сред, в трещиноватой области зоны обрушения при больших скоростях фильтрации линейный закон фильтрации может нарушаться из-за появления значительных по величине сил инерции.

Так как закон Дарси сохраняется только в определенной области скоростей фильтрации, следовательно, за ее пределами должны быть использованы более общие уравнения для правильного представления течения. Для того чтобы охарактеризовать эту область скоростей фильтрации, обычно вводят число Рейнольдса [32].

Безразмерный параметр Re для щели любой формы определяется выражением:

$$Re = \frac{2vd}{\nu}, \quad (1.13)$$

где v – средняя скорость потока, м/с;

ν – кинематическая вязкость, м²/с;

d – гидравлический диаметр (отношение площади «живого» сечения потока к половине «смоченного» периметра), м.

Для трещин прямоугольного сечения:

$$d = \frac{a\delta}{a + \delta} \cong \delta, \quad (1.14)$$

где a – ширина трещин;

δ – среднее раскрытие трещин в породе.

Так как обычно $\delta < a$ и величиной δ в знаменателе по сравнению с a можно пренебречь, то приближенно можно принять $d \cong \delta$.

В трещиноватых зонах скорость фильтрации связана со средней скоростью через трещиноватость [51]

$$v = \frac{u}{k_{mp}}. \quad (1.15)$$

где k_{mp} – коэффициент трещиноватости.

$$k_{mp} = G\delta \quad (1.16)$$

где δ – раскрытие трещин;

G – густота трещин определяемая как отношение числа трещин n , секущих нормаль, к длине нормали, проведенной к поверхностям, образующим трещины

$$G = \frac{n}{L}. \quad (1.17)$$

Проницаемость трещинных сред равна [51]

$$k = \frac{\alpha G \delta^3}{12}. \quad (1.18)$$

где α – безразмерный коэффициент, зависящий от геометрии систем трещин в породе.

Таким образом, на основании (1.16) и (1.18) получим

$$\delta = \sqrt{\frac{12k_{mp}}{k}}, \quad (1.19)$$

и учитывая, что $u = kv$, выражение для числа Рейнольдса в трещиноватой обрешенной зоне имеет вид [51]

$$\text{Re} = \frac{4u\sqrt{3k_{mp}}}{vk\sqrt{k}} \quad (1.20)$$

За нижнюю границу нарушения линейного закона фильтрации в трещиноватой зоне необходимо принимать $\text{Re}_{\text{кр}} = 0,4$. Если $\text{Re}_{\text{кр}} > 0,4$ линейный закон фильтрации не действителен для трещиноватых зон и следует использовать нелинейные законы.

Двучленная формула, учитывающая возрастающую роль сил инерции в связи с увеличением скоростей движения газов через трещиноватую зону, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial p}{\partial L} = a\mu u + b\rho u^2 \quad (1.21)$$

где a, b – некоторые постоянные.

Иногда при нарушении закона Дарси используют одночленный закон фильтрации в виде [52]:

$$u = C_T \left(\frac{\partial p}{\partial L} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1.22)$$

где C и n некоторые постоянные числа, $1 < n < 2$.

1.3 Состояние исследований вентиляционных режимов шахт и рудников с аэроактивными зонами обрушения.

Изучению процессов фильтрации воздуха через пористую среду обрушенных пространств горных пород базирующихся на фундаментальных основах рудничной аэродинамики, созданных трудами А.А. Скочинского, В.Б. Комарова, П.И. Мустеля, Ф.А. Абрамова, А.И. Ксенофонтовой, А.Н. Щербаня, А.М. Карпова и др. посвящены работы К. В. Кочнева, В. П. Куликова, О. С. Гершуна, А. Ф. Милетича, С. И. Луговского В. А., Ярцева, И. Б. Ошмянского, А. Е. Лапшина, С.К. Савенко, Е.Г. Морозова, Т.В. Бунько, В.И. Бережного и др. Авторы их вели исследования по определению режима движения воздуха через кусковатый материал мелких фракций, аэродинамического сопротивления разрушенной горной массы, закона потери напора при движении воздуха через зону обрушения покрывающих пород и разработке приемов управления вентиляцией.

Остановимся на кратком анализе работ в области расчета вентиляционных параметров рудников с аэродинамически активными обрушениями. Опыт эксплуатации вентиляционных систем рудников Кривбасса, Урала, Горной Шории, Заполярья и других районов свидетельствует о том, что для рудников с аэродинамически активными обрушениями необходимо в проектах вентиляции определять аэродинамические параметры обрушений.

В работах, посвященных исследованию внутришахтных утечек воздуха, авторы в основном стремились к установлению закономерностей движения воздуха по сети горных выработок в местах возникновения местных утечек воздуха (выработанные пространства, бутовые полосы, лавы, вентиляционные сооружения и др.) и к определению методов расчета величины утечек воздуха на основании выведенных ими уравнений падения давления и изменения количества воздуха по длине воздухопроводящей выработки (К.З. Ушаков, Ф.С. Клебанов, И.И. Печук, Л.А. Пучков, В.Д. Карпухин, И.И. Медведев и др.).

Большое количество работ посвящено определению режимов движения воздуха через кусковатый материал с мелкими фракциями, установлению аэродинамических сопротивлений разрушенной горной массы, определению закона сопротивления при движении воздушных потоков через толщу обрушенных пород и руды и разработке методов оперативного управления вентиляцией (К.В. Кочнев, С.И. Луговский, В.П. Куликов, О.С. Гершун, А.Ф. Милетич, В.А. И. Б. Ошмянский, А. Е. Лапшин, Ярцев, Ю.А. Шашмурин, С.П. Алехичев, А.Д. Вассерман, С.К. Савенко, Е.Г. Морозов, В.И. Бережной и др.).

Процессы фильтрации газа и жидкости через плотные пористые среды рассмотрены в работах таких ученых как Л.С. Лейбензон, С.А. Христианович, Н.М. Жаворонков, П.Я. Кочин, Н.Н. Павловский, М.А. Лаврентьев, М.Д. Миллионщиков, Д.М. Минц, Е.М. Минский, И.Д. Чарный, В.Н. Щелканов, П.Ф. Фильчаков, В.И. Аравин, М.А. Великанов, В.В. Ланук, С.Н. Нумеров и многих других. Однако большинство работ указанных выше авторов посвящены исследованиям процессов фильтрации жидкости в грунтах под техническими сооружениями из русловых потоков и не дают конкретных решений по расчету аэродинамических параметров обрушений рудников.

Большинство практических задач, связанных с фильтрацией воздуха через кусковой материал обрушений, сводится к установлению законов движения воздуха через кусковатую среду и определению коэффициентов аэродинамического сопротивления в формулах, описывающих законы сопротивления при фильтрации.

Впервые закон сопротивления при фильтрации жидкостей через песчаные грунты исследовал Дарси (1856 г.), который установил, что при ламинарном режиме жидкости зависимость между гидравлическим уклоном I и скоростью фильтрации v_ϕ является линейной [53]

$$I = \frac{h}{L} = \frac{v_\phi \gamma}{K_\phi} = \frac{v_\phi \mu}{K_\Pi}, \quad (1.23)$$

где $I=h/L$ – гидравлический уклон или градиент давления, Па/м;

K_ϕ – коэффициент фильтрации, м/с.

Коэффициент фильтрации K_ϕ в формуле (1.23) есть абсолютная величина скорости установившегося движения воздуха или жидкости и имеет поэтому размерность скорости. Обычно $K_\phi \neq \text{const}$, поэтому ее величина определяется опытным путем, хотя и имеются формулы для ее расчетного определения. При исследовании фильтрации иногда более удобно фильтрационные свойства пористой среды независимо от рода текучего характеризовать коэффициентом проницаемости K

$$K = K_\phi \frac{\mu}{\rho g} \quad (1.24)$$

В связи с тем, что закон Дарси применим только лишь к ламинарному течению, причем, не полностью охватывая и эту область, многочисленные исследования в этой области позволили их авторам предложить целый ряд расчетных формул для описания законов сопротивления или фильтрации.

Работами А. А. Краснопольского [54] установлено, что при фильтрации воды в трещиноватых породах гидравлический уклон пропорционален квадрату v_ϕ .

$$I = K v_\phi^2 \quad (1.25)$$

где K – коэффициент пропорциональности.

Для турбулентного режима движения газа через насадку в скруберах Н.М. Жаворонков [55] получил формулу

$$h = \frac{2fL\rho}{d_s} v_\phi^2, \quad (1.26)$$

где L – высота слоя насадки;

d_s – эквивалентный диаметр канала кусковатого слоя;

f – коэффициент аэродинамического сопротивления.

Уравнение Дарси Н. (1.23) и Жаворонкова Н.М. (1.26) для ламинарного и турбулентного режимов движения могут быть представлены одним общим уравнением [56, 57]

$$h = rLv_{\phi}^n = RQ^n, \quad (1.27)$$

где r – удельный коэффициент сопротивления при ламинарном и турбулентном режимах движения;

n – показатель степени, или показатель режима движения, $1 \leq n \leq 2$;

R – аэродинамическое сопротивление всего пористого слоя.

Рядом исследователей было установлено, что для более высоких скоростей закон Дарси может быть модифицирован дополнением слагаемого второго, а иногда и третьего порядка [58 – 60]

$$h = aQ + bQ^2 + cQ^3, \quad (1.28)$$

где a , b и c – опытные коэффициенты, определяемые экспериментальным путем.

Двучленное уравнение вида (1.28) было в свое время рекомендовано профессором Комаровым В. Б.

Коэффициенты a и b в уравнении (1.28) отдельными исследователями предлагаются различными. В работе Минского Е.М. [59] предлагается

$$a = \frac{\mu L}{KF}; \quad b = 2 \frac{c}{m} \left(\frac{d_s}{\sqrt{K}} \right)^3 \frac{\rho L}{d_s F^2} \quad (1.29)$$

в работах профессора Л.А. Пучкова, С.П. Алехичева [60] и Ю.А. Шашмурина [57]

$$a = \frac{\mu L}{K_{II} F}; \quad b = \frac{\rho L}{l' F^2}, \quad (1.30)$$

где d_3 – средний эффективный диаметр зерна;

$c = 6 \cdot 10^{-5}$ постоянная величина;

K_{II} – пористость;

l' – эмпирический коэффициент "макрошероховатости";

F – площадь фильтрации.

Профессор Милетич А.Ф. [61] и ряд других авторов, рекомендуя формулы вида (1.28), считают, что при малых числах Re можно пренебрегать вторым членом, ввиду его малости, а при устойчивом турбулентном режиме – первым членом уравнения.

В работе [60] режим движения в выработанном пространстве определяется числом Re

$$Re = \frac{v_{\phi} K}{\nu l}, \quad (1.31)$$

где v_{ϕ} – скорость фильтрации, м/с;

ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с.

При $Re \leq 0,25$ имеет место ламинарный режим фильтрации, при $Re < 2,5$ промежуточный и при $Re > 0,25$ – турбулентный.

Обширные исследования аэродинамических свойств обрушений проведены Ю.А. Шашмуриным, Алехичевым С. П. и А.Д. Вассерманом [57, 60, 62]. На основании выполненных исследований установлено, что показатель режима движения в нагнетательном канале вентилятора главного проветривания рудника им. Кирова $n = 1,54$, в блоке 9–10, 10–11 – $n = 1,03$, в блоке 32–1 и 32–31 – $n = 1,17$. Приведенные данные свидетельствуют об отклонении ламинарного режима движения воздуха в блоках и о наличии комбинированного режима движения в общей вентиляционной сети. Поэтому авторы считают вполне целесообразным применение двучленной формулы закона сопротивления.

В целях борьбы с утечками через обрушения авторы рекомендуют применение для проветривания нагорных рудников нагнетательно–всасывающий способ проветривания.

Исследования аэродинамических параметров обрушений рудников Урала выполнены в СГИ под общим научным руководством профессора Ярцева В. А. [12,63, 64]. В СГИ разработана методика определения областей применения однокленной степенной формулы закона сопротивления, исходя из условий обеспечения необходимой точности результатов; установлено, что ряд рудников Урала даже на глубине 2000 – 3000 м от поверхности обрушения будут обладать высокой воздухопроницаемостью, поэтому наиболее эффективными средствами борьбы с утечками является осуществление нагнетательного и нагнетательно–всасывающего способа проветривания.

Вопросы фильтрационного движения воздуха через зоны обрушения рудников Кривбасса и его влияние на режим проветривания были рассмотрены в работе О.С. Гершуна [11]. Аналитическим путем, рассматривая движение воздуха через зону обрушения как случай установившейся одномерной фильтрации газов, им была предложена зависимость для закона движения, используя которую автор утверждает, что при движении воздуха через обрушение рудников Кривбасса имеет место широкий диапазон режимов движения воздуха – от ламинарного до устойчивого турбулентного.

Большой объем исследований в области фильтрационного движения воздуха через обрушенные пространства выполнен в работах Ошмянского И.Б. и Лапшина А.Е. [67 – 70] применительно к условиям рудников Кривбасса. В их работах дан подробный анализ фильтрационных течений воздуха через зоны обрушения восьми рудников региона на основе натуральных измерений, выполненных авторами. Установлены общие показатели режимов движения в вентиляционных сетях отдельных участков рудников бассейна, а также аэродинамические параметры зон обрушения.

1.4 Выводы.

На основании произведенного анализа зон обрушений, вызванных технологическими процессами ведения горных работ, состояния проветривания руд-

ников Кривбасса, а также результатов исследований режимов фильтрации воздуха через обрушенные зоны можно сделать следующие выводы:

1. Производство технологических работ по добыче руды на рудниках Кривбасса вызывает процесс образования аэродинамически активных зон обрушений различных типов (в зависимости от систем разработки и свойств горных пород слагающих разрабатываемый массив), которые оказывают существенное влияние на состояние рудничной атмосферы горных выработок шахт.

2. В вентиляционных системах шахт Кривбасса имеют место значительные внешние и внутренние утечки воздуха, что обуславливает существенные непроизводительные затраты на проветривание и существенно ухудшает состояния рудничной атмосферы, особенно в горных выработках примыкающих к обрушенным пространствам.

3. Широко применяемые камерные системы разработки и системы поэтажного принудительного обрушения с наличием аэродинамической связи обрушенного пространства с горными выработками обуславливает необходимость оценки его влияния на участки горных работ примыкающие к очистному пространству и разработки способов снижения этого влияния на основные параметры рудничной атмосферы горных выработок шахт.

4. Анализ проведенных ранее исследований аэродинамических параметров обрушений свидетельствует о том, что большая часть их базируется на использовании двучленного закона сопротивления, в который вводятся геометрические характеристики кусковой среды. Однако наличие широкого диапазона фракционного состава пород в зонах обрушениях рудников и отсутствие методов его учета приводит к значительным погрешностям при расчетах величин аэродинамического сопротивления и фильтрационных утечек.

5. Несмотря на значительный объем выполненных ранее аналитических исследований для установления закона сопротивления при движении воздуха через обрушенные пространства рудников, до настоящего времени не разработаны достаточно эффективные методы учета влияния аэродинамически актив-

ных обрушений на основные вентиляционные параметры при проектировании проветривания рудников.

6. Улучшение состояния рудничной атмосферы на рабочих местах в железорудных шахтах, как в техническом, так и в гигиеническом аспектах, возможно только при наличии достоверных данных о механизме переноса газообразных примесей через пористую среду обрушенных зон. Эти данные позволят достаточно точно прогнозировать режимы движения газовой смеси, которые, при определенных условиях, могут оказывать значительное влияние на состояние рудничной атмосферы и создавать способы управления фильтрационными процессами в аэродинамически активных обрушенных зонах, примыкающих к горным выработкам.

Учитывая изложенное, сформулирована цель и задачи исследований, приведенные во введении к диссертационной работе.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В АЭРОАКТИВНЫХ ЗОНАХ ОБРУШЕНИЙ РУДНИКОВ КРИВБАССА

2.1. Обоснование физической модели фильтрационных течений в пористых средах зон обрушения горных пород.

Ввиду чрезвычайной сложности реальных процессов фильтрации флюидов в обрушенных зонах, построить полностью подобные физические или геометрические модели не представляется возможным. Поэтому ограничиваемся приближенным моделированием фильтрационных течений, позволяющих обеспечить адекватное математическое описание процесса миграции флюидов в обрушенном массиве горных пород. Изучение этого процесса можно проводить на упрощенных (идеализированных) моделях–схемах одномерных фильтрационных потоков при установившихся или неустойчивых режимах.

При изучении фильтрационных потоков в обрушенном массиве горных пород необходима схематизация форм движения, позволяющая формировать расчетные схемы, учитывающие основные явления, а также определять основные параметры течения.

При изучении элементарных фильтрационных потоков в подземной гидромеханике основными являются модели установившейся и неустойчивой фильтрации однофазных флюидов (несжимаемых или сжимаемых) в однородной (изотропной) пористой среде. Эти модели являются классическими и позволяют изучать фильтрационные течения методами математической физики.

Однако необходимость решения более сложных неоднородных задач фильтрации жидкостей, газов и их смесей в пористых средах зон обрушения потребовала создания более совершенных математических моделей, основанных на лучшем знании и понимании гидродинамических и физико-химических процессов, происходящих в обрушенных породах при подземной разработке

месторождений. Использование этих моделей, как правило, связано с применением численных методов и современной вычислительной техники.

В результате выполненных ранее исследований [16, 17, 71, 72] было установлено, что движение фильтрационных потоков через обрушенные зоны происходит по плоскопараллельной и плоскорадиальной схемам течения (рис. 2.1).

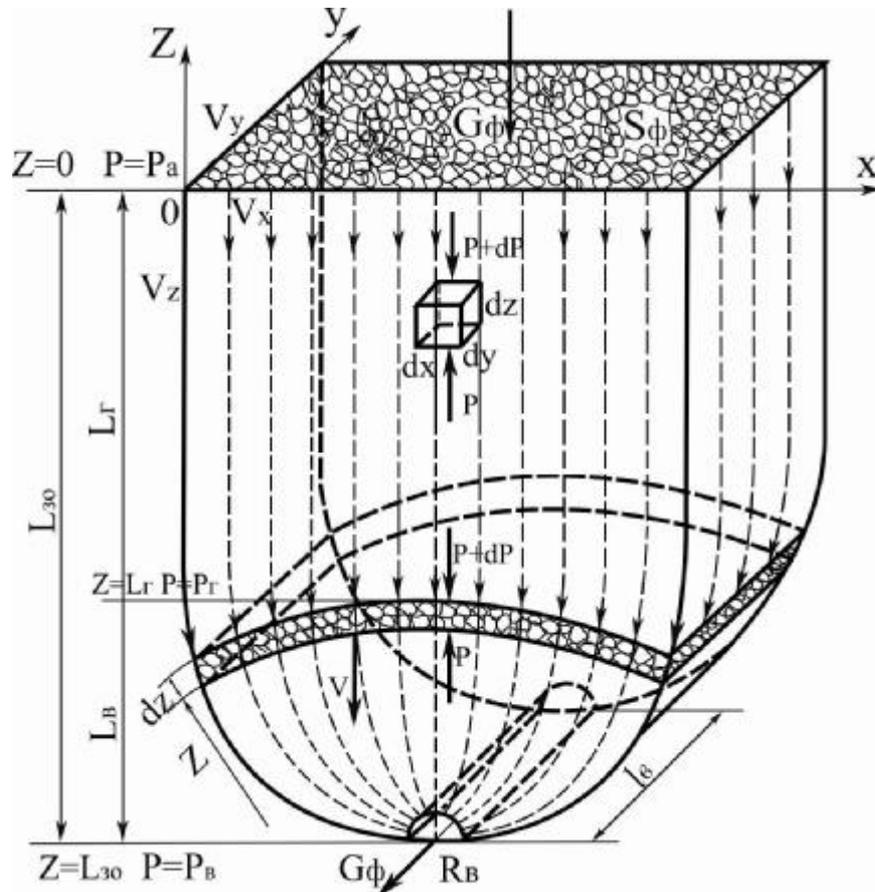


Рисунок 2.1 – Физическая модель фильтрации воздуха через пористую среду зоны обрушения: L_{30} – толщина обрушенных пород зоны обрушения, м; L_2 – толщина обрушенных пород от границы сдвига до поверхности с прямолинейно–параллельной схемой течения воздуха, м; $L_в$ – толщина обрушенных пород от уровня вентиляционного горизонта до границы сдвига с плоско–радиальной схемой течения воздуха, м; $R_в$ – характерный радиус примыкающей выработки, м; P_2 – давление на уровне вентиляционного горизонта, Па; P_a – давление на поверхности, Па; $P_в$ – давление в примыкающей выработке

Наиболее простая прямолинейно–параллельная схема течения воздуха через зону обрушения находится на участке L_2 . При этой схеме неизменной со-

храняется площадь поперечного сечения движущегося потока, траектории всех частиц воздуха параллельны, а скорости фильтрации во всех точках любого поперечного (перпендикулярного линиям тока) сечения равны друг другу. Законы движения вдоль всех траекторий такого фильтрационного потока одинаковы, а поэтому достаточно изучить движение вдоль одной из траекторий, которую можно принять за ось координат – ось z .

На участке с плоско–радиальным потоком скорость фильтрации изменяется по высоте и зависит от радиуса полусферы r площади фильтрации относительно оси выработок, примыкающей снизу к обрушенному пространству (рис.2.1). Частицы воздуха будут двигаться по вертикальным траекториям, радиально сходящимся к примыкающей выработке. Картина линий тока в любой горизонтальной плоскости будет одинакова, и для полной характеристики потока достаточно изучить движение флюида в одной горизонтальной плоскости. В плоскорадиальном одномерном потоке давление и скорость фильтрации в любой точке зависят только от расстояния r данной точки от оси выработки.

Описанные схемы одномерных фильтрационных потоков позволяют создавать простейшие модели реальных течений, возникающих при образовании обрушенных зон в период разработки месторождений и решать практические задачи.

Задача исследования установившегося фильтрационного потока заключается в определении следующих характеристик: дебита (или расхода), давления, скорости фильтрации в любой точке потока, а также установление закона движения частиц жидкости или газа вдоль их траекторий и определение средне-взвешенного по объему порового пространства давления в обрушенном массиве.

Для расчета перечисленных характеристик одномерных фильтрационных потоков жидкости и газа используем подход, основанный на выводе дифференциальных уравнений и их решений отдельно для прямолинейно–параллельного и плоскорадиального потоков жидкости и газа.

2.2. Математическая модель процесса фильтрации газа через зону обрушения горных пород с учетом изменения свойств реального газа и горных пород.

Разработка математической модели фильтрационных процессов в обрушенном пространстве сводится к решению следующих основных задач:

- описанию процесса фильтрации воздуха через зону обрушения и получению уравнения взаимодействия воздушного потока с пористой средой обрушенного массива горных пород;
- определению характеристик фильтрационных процессов;
- определению основных аэродинамических параметров зон обрушения.

Движение воздуха через зоны обрушения, представляющие собой пористые среды различного типа (гранулярные, трещиноватые и смешанные) связано тем, что даже при незначительных перепадах давления и дебитах наблюдается заметное действие как вязкостных, так и инерционных сил. В этих условиях, подход к установлению аналитических зависимостей процессов, происходящих в обрушенном пространстве, с позиций подземной газодинамики наиболее строго соответствует физической сущности рассматриваемых явлений.

Аналитическое и численное исследование задач связано с применением основных законов течения в дифференциальной форме.

Для газодинамики в зонах обрушения, вследствие значительных величин удельной поверхности пористой среды и ее теплоёмкости [31, 73], можно не рассматривать уравнение энергии и ограничиваться уравнениями баланса массы (неразрывности) и движения. В этом случае необходимо иметь уравнения – дифференциальные и конечные (определяющие) – для определения характеристик фильтрационного потока и пористой среды.

Известно, что фильтрационное движение газа описывается системой уравнений, включающей уравнения сохранения массы флюида в пористой среде (уравнение неразрывности при фильтрации газа в пористой среде), уравнения движения (фильтрации) и уравнения состояния.

Для замыкания системы уравнений необходимо введение замыкающих соотношений, а именно уравнений состояния газа и пористой среды. Кроме того для получения однозначного решения необходимо задание граничных и начальных условий. Замкнутые системы уравнений определяют и задают математическую модель фильтрации. Это уравнения в виде зависимости плотности, пористости, проницаемости, вязкости от давления [74, 75].

Граничные условия зависят от схемы фильтрационного потока и газового баланса.

Рассмотрим пространство с определенным количеством обрушенной горной массы, представляющей собой среду с высокоразвитой поверхностью, обладающей определенными свойствами (пористостью, проницаемостью) и в которую вводится поток газа.

Задача заключается в том, чтобы, при известных исходных данных (характеристики обрушенного массива горных пород), характере взаимодействия между обрушенной горной массой и газом, а также других условиях, оказывающих влияние на режим фильтрации, определить количественные характеристики фильтрационного потока для любого момента времени.

Это задача динамики флюида в пористых и трещиноватых горных породах, которая, согласно существующей теории [31, 32, 34, 49], должна учитывать основные стороны этого сложного физического явления.

Для описания процессов происходящих в зонах обрушения используем общую теорию фильтрации флюидов через пористую среду, формулирующую самые общие закономерности и методы, справедливые для любых видов движения флюидов в пористой среде [31, 32, 76] с учетом следующих упрощающих допущений:

- процесс фильтрации политропный;
- движущаяся среда гомогенна;
- подвижная фаза несжимаема, вследствие сравнительно небольших перепадов давления вызывающих перемещение газа;
- пористая среда недеформируема;

– плотность газа постоянна;
 – движение потока осуществляется в одном направлении и с постоянной скоростью.

Математические модели изотермической однофазной фильтрации в изотропной пористой среде включают закон сохранения массы, закон сохранения импульса в виде закона фильтрации Дарси, определяющие уравнения в виде зависимости плотности, пористости, проницаемости, вязкости от давления [75, 77].

Закон сохранения массы. Уравнение неразрывности движения при фильтрации газа в пористой среде.

Уравнение неразрывности потока, отражающее закон сохранения массы имеет следующий вид [75]:

$$\frac{\partial(K_{II}\rho)}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \bar{u} = 0, \quad (2.1)$$

где \bar{u} – осредненная скорость в поровых каналах, м/с.

При выполнении операции дивергенции в выражении (2.1), получается

$$\frac{\partial(K\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial z} = 0. \quad (2.2)$$

Уравнение (2.2) является уравнением неразрывности при фильтрации газа через пористую среду и выражает закон сохранения массы в пористой среде в дифференциальной форме только для газа, так как при выводе указанного уравнения учитывалось распределение по всему объему только характеристик фильтрующегося газа.

Если проницаемость вынести за знак производной, при условии постоянства ее величины, то уравнение неразрывности можно представить в следующем виде:

$$K \frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial z} = 0. \quad (2.3)$$

Газ, находящийся в поровом пространстве обрушенной зоны, в начальных условиях к задаче принят несжимаемым, поэтому $\rho = \text{const}$, а уравнение неразрывности для обрушенной зоны принимает более простой вид:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial z} = 0.$$

Уравнение движения газа в пористой среде обрушенной зоны горных пород.

При фильтрации флюида в пористой среде площадь соприкосновения между флюидом и твердыми частицами огромна, в связи с чем флюиду приходится преодолевать большую силу трения, а трение между жидкостью и твердым телом обусловлено вязкостью. Поэтому в качестве определяющих уравнений выступает закон вязкого трения Навье-Стокса [32], который задает реологию ньютоновской вязкой жидкости. В этом случае для изучения движения флюида в пористой среде, необходимо осреднить это движение по всему объему пористой среды, в результате чего получается закон Дарси. Однако, осреднение уравнений движения вязкой жидкости (уравнения Навье-Стокса) невозможно, так как даже в простейшем случае фиктивного грунта движение жидкости представляет собой обтекание бесчисленного множества шаров, вследствие чего прямое интегрирование уравнений Навье-Стокса при столь сложных граничных условиях, даже если пренебречь инерционными силами, не представляется возможным. Поэтому прибегают к методу Н.Е. Жуковского, который заключается в применении уравнений движения идеальной жидкости в форме Эйлера. При этом к действительно существующим массовым силам прибавляют «фиктивные» массовые силы, которые заменяют эффект вязкости и называются фиктивными силами сопротивления Жуковского [31].

Для упрощения рассуждений рассматривают случай одномерного течения [32]

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho f ,$$

где f – проекция плотности объемных (массовых) сил на направление движения;

v – истинная средняя скорость движения.

При движении флюида в пористой среде, на границе раздела «флюид - пористая среда» появляется сила трения. Так как поверхность поровых каналов сравнительно велика, а сила трения при переходе от истинной средней скорости фильтрации к скорости фильтрации рассредоточена по всей области, то силу трения считаем объемной силой. В связи с этим плотность объемных сил представляется как [78]

$$f = f_1 + f_2,$$

где f_1 – проекция плотности объемной силы тяжести; для горизонтального потока равна нулю, а если ось потока наклонена к горизонтали под углом α , то

$$f_1 = g \sin \alpha = (z_1 - z_2) \frac{g}{l} ;$$

f_2 – проекция объемной силы трения, которая вызвана течением в пористой среде.

Считая, что проницаемость пористой среды постоянна а слагающие ее породы изотропны, переходят от истинной средней скорости к скорости фильтрации [78]:

$$\frac{\rho}{s} \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \frac{u}{s^2} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z} + \rho f .$$

Так как изменение скорости во времени незначительно, то членом $\frac{\partial v}{\partial t} \left(\frac{\partial v}{\partial t} \approx 0 \right)$ пренебрегают. В левой части уравнения второе слагаемое представ-

ляющее собой инерционный член, весьма мал в условиях незначительных скоростей фильтрации и находится в пределах выполнения закона Дарси. Поэтому

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \rho(f_1 + f_2).$$

Сила вязкого трения пропорциональна скорости фильтрации в первой степени $\rho\lambda w$, поэтому:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \rho\lambda u + \rho \frac{z_1 - z_2}{l} g.$$

При $\lambda = -\frac{\mu}{\rho k}$, получается закон Дарси для фильтрации газа в следующем виде:

$$\bar{u} = -\frac{k}{\mu} (\overline{\text{grad } p} + \rho \bar{f}).$$

Исследования законов сопротивления при фильтрации воздуха сквозь пористые среды свидетельствуют об ограниченной области применения линейного закона сопротивления, определяемого уравнением Дарси [78]. В «кусковатых» обрушенных породах рудников имеются более благоприятные условия для возникновения комбинированного режима движения и нарушения закона Дарси [63], поэтому более целесообразно применять для установившегося потока двучленную формулу закона сопротивления при фильтрации [79].

При нелинейной фильтрации несжимаемой жидкости по закону Форхгеймера [31, 80] система уравнений для фильтрации в изотропной пористой среде имеет вид:

$$\text{div } \bar{w} = 0,$$

$$\overline{\text{grad } p} = -\frac{k}{\mu} \bar{w} - \beta \frac{\rho}{\sqrt{k}} w \bar{w},$$

а при фильтрации по степенному закону

$$\operatorname{div} \bar{w} = 0,$$

$$\bar{w} = c |\operatorname{grad} p|^{\frac{1-n}{n}} \overline{\operatorname{grad} p}.$$

Аналогичным образом установлена и математическая модель при установившейся фильтрации газа при нелинейной фильтрации

$$\operatorname{div} \bar{w} = 0,$$

$$\overline{\operatorname{grad} p} = -\frac{k}{\mu} \bar{w} - \beta \frac{\rho}{\sqrt{k}} w \bar{w},$$

$$\rho = \rho(p)$$

и по степенному закону

$$\operatorname{div} \rho \bar{w} = 0,$$

$$\bar{w} = c |\operatorname{grad} p|^{\frac{1-n}{n}} \overline{\operatorname{grad} p}$$

$$\rho = \rho(p)$$

Фильтрационные свойства пористой среды обрушенной зоны зависят от гранулометрического состава, величины горного давления, величины фракций породы, формы, шероховатости поровых каналов и характеризуются, как известно, коэффициентом пористости K_n и коэффициентом проницаемости K .

Действительная форма и размеры частиц породы реальных зон обрушений, взорванного массива в камерах, размеры и направление поровых каналов имеют спорадический характер, поэтому при изучении фильтрационных свойств пористой среды обрушенных зон обычно пользуются осредненными значениями скоростей, давлений, расходов. При таком допущении реальный поток воздуха при рассмотрении фильтрации заменяется фиктивным фильтрационным потоком, имеющим одинаковые аэродинамические параметры с действительным потоком. Между скоростью фильтрации v_ϕ и средней скоростью в поровых каналах u_{cp} существует зависимость [25]

$$v_{\phi} = K_{\Pi} u_{cp}$$

где K_{Π} – коэффициент пористости.

При такой постановке вопроса, в случае изучения движения воздуха через обрушенные зоны, возможно использование из гидроаэродинамики дифференциальных уравнений движения воздуха сквозь пористые среды.

Основной задачей аэродинамики является нахождение полей скорости, давления и плотности в потоке воздуха, движущегося под действием заданных внешних сил, т.е. нахождение следующих функций координат и времени [81]:

$$\begin{aligned} v'_x &= f_1(x, y, z, t); v'_y = f_2(x, y, z, t); v'_z = f_3(x, y, z, t); \\ P &= f_4(x, y, z, t); \rho = f_5(x, y, z, t). \end{aligned}$$

Уравнения движения и неразрывности достаточны для решения основной задачи гидроаэродинамики любой жидкости, у которой плотность ρ и оба коэффициента вязкости зависят только от давления P . В частности, это верно для идеальной несжимаемой жидкости, идеальной баротропной жидкости, а также для изотермического движения вязкой жидкости. Во всех остальных случаях для решения основной задачи гидроаэродинамики необходимо использовать расширенную систему уравнений, состоящих из уравнения движения, неразрывности, энергии, состояния жидкости и уравнений, выражающих зависимости динамической и кинематической вязкостей от параметров состояния жидкости.

Для решения основных задач фильтрации флюида сквозь пористые среды используют основные уравнения движения в векторной форме в проекциях на оси координат для идеальной несжимаемой жидкости [81].

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} &= K_{\Pi} (F_x + R_x) - \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} &= K_{\Pi} (F_y + R_y) - \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dy} \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= K_{\Pi} (F_z + R_z) - \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dz} \end{aligned} \right\}, \quad (2.4)$$

где F_x, F_y, F_z – проекции на оси системы координат вектора F результирующей напряженности поля массовых сил, действующих на флюид, Н/кГ;

R_x, R_y, R_z – проекции на оси вектора R силы сопротивления движения воздуха через пористую среду, приходящиеся на единицу массы жидкости, Н/кГ;

P – давление жидкости, Па;

v_x, v_y, v_z – проекции скорости фильтрации жидкости v_ϕ , м/с.

При установившемся движении в условиях фильтрации

$$\frac{dv_\phi}{dt} = 0 \text{ и } \frac{dv_x}{dt} = \frac{dv_y}{dt} = \frac{dv_z}{dt} = 0,$$

тогда уравнения (2.4) примут вид

$$\left. \begin{aligned} K_{II}(F_x + R_x) - \frac{dP}{\rho} dx &= 0 \\ K_{II}(F_y + R_y) - \frac{dP}{\rho} dy &= 0 \\ K_{II}(F_z + R_z) - \frac{dP}{\rho} dz &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Для условия нашей задачи, схема к решению которой приведена на рис. 2.1, ось OZ направлена вверх, поэтому $F_z = F = -g$, $F_x = F_y = 0$ и уравнения (2.5) в векторной форме будут иметь вид [3]:

$$K_{II}(R - g) - \frac{dP}{\rho} dz = 0. \quad (2.6)$$

Сила сопротивления R движения воздуха через пористую среду при фильтрации, приходящаяся на единицу массы жидкости, может быть выражена двучленной формулой, причем вектор силы направлен в обратном направлении по отношению к скорости фильтрации [3]

$$R = -av_{\phi} - bv_{\phi}^2, \quad (2.7)$$

где a и b – коэффициенты, определяемые экспериментально при фильтрации флюида через пористую среду.

Тогда после подстановки (2.7) в (2.6) получим

$$\frac{dP}{dz} = K_{\Pi} \rho (-av_{\phi} - bv_{\phi}^2 - g).$$

Результаты экспериментальных исследований позволили установить, что наиболее целесообразно для описания фильтрации при нарушении закона Дарси использовать двучленную формулу в следующем виде [46, 47, 67, 78, 79, 82]:

$$-\frac{dP}{dz} = \mu \frac{v_{\phi}}{K} + \rho_{cp} \frac{v_{\phi}^2}{K_T} + \rho_{cp} g K_{\Pi}, \quad (2.8)$$

где K – коэффициент характеризующий проницаемость пористой среды при ламинарном режиме течения, м;

K_T – коэффициент характеризующий проницаемость пористой среды при турбулентном режиме течения, зависящий от геометрических характеристик фракций пород в обрушениях, определяющих нарушение закона Дарси, определяется экспериментально;

ρ_{cp} – средняя плотность воздуха в обрушенном пространстве, кг/м³.

При всасывающем способе проветривания рудников через аэродинамически активную зону обрушения под действием создаваемого вентиляторами давления воздушный поток движется сверху вниз в плоскости XOZ по направлению оси OZ (рис. 2.1), поэтому $v_x = v_y = 0$, а $v_z = -v_{\phi}$.

На участке прямолинейно–параллельного потока фильтрации длиной L_T от поверхности принимаем, что $\frac{dP}{dZ} = \frac{dP}{dL} = const$, а скорость фильтрации на этом участке в вертикальном направлении [3]

$$v_\phi = \frac{Q_\phi}{S_\phi}, \quad (2.9)$$

где Q_ϕ – расход воздуха при фильтрации его через обрушенное пространство, м³/с;

S_ϕ – площадь фильтрации на участке прямолинейно–параллельного потока, м².

Для нестационарных условий удельный вес воздуха γ изменяется в зависимости от температуры T и давления P

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \frac{P_a \cdot 10^{-5}}{1,01332} \cdot \frac{273 + 20}{T} = 0,29 \cdot 10^{-2} \gamma_0 \frac{P_a}{T},$$

где P_a – атмосферное (барометрическое) давление, Па;

T – абсолютная температура, К;

С учетом этого основное уравнение фильтрационного движения (2.8) для прямолинейно–параллельного потока имеет вид

$$dP_{III} = \left(\frac{\mu Q_\phi}{S_\phi K} + \frac{Q_\phi^2}{S_\phi^2 K_T} - \frac{0,003 \cdot \gamma_0 P_a K_{II}}{T} \right) dl \quad (2.10)$$

На участке с плоскорадiallyм потоком скорость фильтрации изменяется по высоте и зависит от радиуса полусферы r площади фильтрации относительно оси выработок, примыкающей снизу к обрушенному пространству (рис.2.1)

$$v_{\phi} = \frac{Q_{\phi}}{\pi r l_{\phi}}, \quad (2.11)$$

где l_{ϕ} – длина выработки, м.

С учетом (2.11) уравнение закона фильтрации для этого участка обрушенного пространства в дифференциальной форме будет иметь вид

$$dP_{\text{ПР}} = \left(\frac{\mu Q_{\phi}}{\pi r l_{\phi} K} + \frac{Q_{\phi}^2}{\pi^2 r^2 l_{\phi}^2 K_T} - \frac{0,003 \cdot \gamma_0 P_a K_{\text{П}}}{T} \right) dr. \quad (2.12)$$

2.3 Начальные и граничные условия при фильтрации газа через обрушенные зоны

Для получения однозначного решения, необходимо задание граничных и начальных условий.

Зону обрушения или выделенную из нее часть можно рассматривать как некоторую область пространства, ограниченную поверхностями (границами). Границы могут быть непроницаемыми для газов, например горные породы нетронутого массива, уплотненные горным давлением мелкозернистые частицы пород, сбросы и поверхности выклинивания рудного тела. Граничной поверхностью также является поверхность, по которой обрушенная зона сообщается с каналом аэродинамической связи (с дневной поверхностью или с горными выработками) – это так называемый контур дебита газа (плоскость примыкания обрушенной зоны к каналу аэродинамической связи с дневной поверхностью или с горными выработками).

Чтобы получить решение системы уравнений, к ним необходимо добавить начальные и граничные условия, которые задают конкретный физический процесс.

Начальное условие заключается в задании искомой функции во всей области в некоторый момент времени, принимаемый за начальный. Для такой ис-

комой функции как давление в зоне обрушения, начальное условие имеет следующий вид [3]:

$$P = P_0(x, y, z) \text{ при } t = 0,$$

т.е. в начальный момент времени задается распределение давления во всем обрушенном пространстве. Если в начальный момент времени обрушенное пространство находится в состоянии покоя, то начальное условие примет вид

$$P = P_0 = \text{const} \text{ при } t = 0. \quad (2.13)$$

Условие (2.13) справедливо, если не учитывается сила тяжести, если же сила тяжести учитывается, то распределение давления будет гидростатическим.

Граничные (краевые) условия задаются на границах зоны обрушения. Число граничных условий должно быть равно порядку дифференциального уравнения.

Возможны следующие граничные условия.

На внешней границе Ω :

1) постоянное давление

$$p(\Omega, t) = p_k$$

т.е. граница является контуром дебита газа;

2) постоянный переток через границу при выполнении закона Дарси

$$u_n = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial n} = \text{const},$$

где n – нормаль к границе Ω , откуда следует, что

$$\partial P / \partial n = \text{const};$$

3) переменный переток через границу

$$\partial P / \partial n = f(t);$$

4) замкнутая внешняя граница

$$\partial P / \partial n = 0,$$

где n – нормаль к границе Ω ;

5) бесконечная по простиранию (падению) зона обрушения при прямолинейно–параллельной фильтрации

$$\lim_{x \rightarrow \infty, y \rightarrow \infty} P(x, y) = P_k = const.$$

На внутренней границе (при радиально–сферической фильтрации):

б) постоянное давление в примыкании канала аэродинамической связи к поровому пространству с гидравлическим радиусом r_k

$$P(r, t) = P_k \text{ при } r = r_k;$$

7) переменное давление в примыкании канала аэродинамической связи к поровому пространству с гидравлическим радиусом r_k

$$P(r, t) = P_k(t) \text{ при } r = r_k;$$

8) постоянный дебит при выполнении закона Дарси

$$Q = u_k S = \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r} \pi r^2 = const \quad \text{при } r = r_k$$

или

$$\frac{Q}{\pi} = r^2 \frac{\partial P}{\partial r} \quad \text{при } r = r_k,$$

где $S = \pi r^2$ – площадь поперечного сечения канала аэродинамической связи;
9) переменный дебит

$$r^2 \frac{\partial P}{\partial r} = f(t) \quad \text{при } r = r_k;$$

10) герметизация канала аэродинамической связи

Для условий рассматриваемой задачи на участке прямолинейно–параллельного потока в случае стационарного движения воздуха с постоянной плотностью ($v_\phi = const$ и $\gamma_{cp} = const$) начальные и граничные условия будут:

$$\begin{aligned} \text{при } t = 0, Z = 0, P = P_a, \\ \text{при } Z = L_z, P = P_z, \end{aligned}$$

где P_z – давление воздуха на уровне границы прямолинейно–параллельного и плоско–радиального потоков воздуха в обрушенном пространстве, Па.

Одновременно с этим предполагаем, что проницаемость обрушенных пород на этом участке постоянна ($K = const$).

2.4. Анализ теоретических решений и получение аналитических приближений.

Проинтегрировав (2.10) при указанных граничных условиях, получим [3]

$$P_z - P_a = \frac{\mu L_z Q_\phi}{S_\phi K} + \frac{0,003 \cdot \gamma_0 P_a L_z}{T} \frac{Q_\phi^2}{S_\phi^2 K_T g} - \frac{0,003 \cdot \gamma_0 P_a L_z}{T} K_{II}. \quad (2.14)$$

При обозначении $\frac{0,003 \cdot \gamma_0 P_a L_z}{T} K_{II} = \Delta P_a^{nn}$ а $P_z - P_a = h_{з.о.}^{nn}$,

где ΔP_a^{nm} – приращение аэростатического давления на участке прямолинейно–параллельного потока фильтрации, Па;

$h_{з.о.}^{nm}$ – депрессия зоны обрушения при прямолинейно–параллельном потоке фильтрации, Па,

выражение (2.14) имеет следующий вид:

$$\Delta P_a = \frac{\mu L_z Q_\phi}{S_\phi K} + \frac{0,003 \cdot \gamma_0 P_a L_z}{T} \frac{Q_\phi^2 \text{sign}(Q_\phi)}{S_\phi^2 K_T g}, \quad (2.15)$$

где $\text{sign}(Q_\phi)$ – символ знака фильтрационного расхода; при $\text{sign}(Q_\phi) = -1$ имеют место приточки воздуха с поверхности в шахту при всасывающем способе проветривания; при $\text{sign}(Q_\phi) = +1$ – утечки воздуха из шахты на поверхность при нагнетательном или комбинированном способах проветривания.

Из формулы (2.15) величина массового расхода фильтрационных утечек через зону обрушения на участке с прямолинейно–параллельным потоком

$$Q_\phi = \frac{K_T \mu S_\phi}{2K} \left(\sqrt{1 + \frac{0,0116 \cdot \lambda_0 P_a K^2 h_{з.о.}^{nm}}{\mu L_z g T K_T}} - 1 \right).$$

Интегрирование уравнения (2.12) при начальных условиях $P(r = L_\epsilon) = P_\epsilon$, $R = R_\epsilon) = P_\epsilon$, позволяет получить

$$P_\epsilon - P_\epsilon = \frac{\mu Q_\phi}{\pi l_\epsilon K} \ln \frac{L_\epsilon}{R_\epsilon} + \frac{0,003 \cdot \gamma_0 P_a Q_\phi^2}{\pi^2 l_\epsilon^2 g K_T T} \left(\frac{1}{R_\epsilon} - \frac{1}{L_\epsilon} \right) - K_\Pi \frac{0,003 \cdot \gamma_0 P_a}{T} (L_\epsilon - R_\epsilon). \quad (2.16)$$

Обозначив в формуле (2.16)

$$K_\Pi \frac{0,003 \cdot \gamma_0 P_a}{T} (L_\epsilon - R_\epsilon) = \Delta P_a^{np},$$

$$P_2 - P_1 + \Delta P_a^{np} = h_{3.o.}^{np},$$

и пренебрегая величиной $1/L_2$ по сравнению с $1/R_2$ получим

$$h_{3.o.}^{np} = \frac{\mu Q_\phi}{\pi l_2 K} \ln \frac{L_2}{R_2} + \frac{0,003 \cdot \gamma_0 P_a Q_\phi^2 \text{sign}(Q_\phi)}{\pi^2 l_2^2 R_2 K_T g T}. \quad (2.17)$$

На участке плоско–радиального потока от $R = L_2$ до $R = R_2$ градиент давления h/L и скорость фильтрации v_ϕ не являются постоянными, так как площадь фильтрации $S_\phi^{mn} = \pi r l_2$ уменьшается по мере приближения воздушного потока к примыкающим выработкам.

Тогда на основании формул (2.15) и (2.17) общее уравнение для закона фильтрации через обрушения рудников будет иметь вид [3]:

$$h_{3.o.} = h_{3.o.}^{mn} + h_{3.o.}^{np} = \frac{\mu Q_\phi}{K} \left(\frac{L_2}{S_\phi} + \frac{\ln \frac{L_2}{R_2}}{\pi l_2} \right) + \frac{0,003 \cdot \gamma_0 P_a Q_\phi^2 \text{sign}(Q_\phi)}{g K_T T} \left(\frac{L_2}{S_\phi^2} + \frac{1}{\pi^2 l_2^2 R_2} \right). \quad (2.18)$$

В выражении (2.18) в первом слагаемом выделим линейную составляющую общего аэродинамического сопротивления зоны обрушения $R_{лин.}$, а во втором квадратичную $R_{кв.}$.

$$R_{лин.} = \frac{\mu}{K} \left(\frac{L_2}{S_\phi} + \frac{\ln \frac{L_2}{R_2}}{\pi l_2} \right), \quad (2.19)$$

$$R_{кв.} = \frac{0,003 \cdot \gamma_0 P_a}{g K_T T} \left(\frac{L_2}{S_\phi^2} + \frac{1}{\pi^2 l_2^2 R_2} \right), \quad (2.20)$$

после чего получим формулу для подсчета депрессии обрушенных пространств рудников в упрощенном виде

$$h_{з.о.} = R_{лин.} Q_{\phi} + R_{кв.} Q_{\phi}^2. \quad (2.21)$$

Решение уравнения (2.21) относительного расхода фильтрационных утечек воздуха через обрушения при комбинированном режиме движения позволяет получить [3, 67]

$$Q_{\phi} = \frac{K_T \mu g \left(\frac{L_z}{S_{\phi}} + \frac{\ln \frac{L_6}{R_6}}{\pi l_6} \right)}{0,006 \gamma_0 \frac{P_a}{T} K \left(\frac{L_z}{S_{\phi}^2} + \frac{1}{\pi^2 l_6^2 R_6} \right)} \left[\left(1 + \frac{0,012 \cdot K^2 \gamma_0 P_a h_{з.о.} \left(\frac{L_z}{S_{\phi}^2} + \frac{1}{\pi^2 l_6^2 R_6} \right)}{K_T \mu^2 g T \left(\frac{L_z}{S_{\phi}} + \frac{\ln \frac{L_6}{R_6}}{\pi l_6} \right)^2} \right)^{-1} \right] \quad (2.22)$$

Уравнения (2.18) и (2.22) выведены из условия, что в зоне обрушения рудников в пределах от $Z = 0$ до $Z = L_z$ проницаемость кускового и пористого материала K одинакова, так как границы отдельных слоев с различной проницаемостью в пределах обрушений установить не представляется возможным. Принятие $K = const$ позволяет решить систему уравнений, хотя принятые допущения снижают точность математических вычислений. Формулы (2.15) и (2.17) выведены для одного отдельного обрушения и при наличии одной прилегающей выработки. При наличии на руднике отдельных, аэродинамически не связанных между собой обрушений, параметры для каждого из них L_T , S_{ϕ} , K , K_T , l_6 , μ , R_6 должны приниматься отдельно. В тех случаях, когда на руднике в пределах каждого вентиляционного участка имеются обширные аэродинамически активные обрушения с большим числом бывших выработок откаточных, вентиляционных, доставочных горизонтов, то при расчетах по формулам (2.18)

и (2.22) необходимо использовать средние значения их аэродинамических параметров (L_T, K, K_T, μ), общую величину S_ϕ , общую длину всех выработок l_g при средней величине R_B . В этом случае при какой-то средней величине h_{30} для всего вентиляционного участка, по формуле (2.22) вычисляется общий фильтрационный расход утечек воздуха через обрушения.

Надежность рассчитанных по предложенным формулам величин Q_ϕ, h_{30}, v_ϕ будет определяться достоверностью таких исходных аэродинамических параметров как коэффициент проницаемости K при ламинарном режиме течения и коэффициент турбулентной проницаемости K_T , которые должны определяться экспериментальным путем.

2.5 Прогнозирование возможности поступления токсичных и вредных примесей с утечками воздуха в подземные выработки через зону обрушения.

2.5.1 Перенос вредных примесей фильтрационными утечками атмосферного воздуха в обрушенных зонах горных пород.

Различная интенсивность утечек через обрушенную зону является причиной существования нескольких режимов движения воздуха в ней. Утечки в значительной степени определяются проницаемостью горных пород.

В обрушенную зону может поступать газ как из внешних так и внутренних источников. К внешним источникам относятся все явления связанные с образованием газа на поверхности (процессы горения, промышленные производства и др.). К внутренним источникам относятся полости заполненные газами ВВ образованных при взрывных работах.

Движущей силой газов из обрушенных зон является разность давлений на поверхности и в горных выработках.

Газовыделение из обрушенной зоны в окружающие выработки может существенно изменяться во времени вследствие изменения давления в выра-

ботках (депрессии вентилятора или атмосферного давления), поскольку такие могут вызывать дополнительный вынос ранее накопившегося в обрушенной зоне газа или накопление газа в последней. Подобные явления составляют основу экстремальных переходных газодинамических процессов в рудниках [83 – 85].

На распределение газа в обрушенной зоне основное влияние оказывают утечки воздуха. Газы, растворенные в потоке атмосферного воздуха, переносятся этим потоком и одновременно диффундируют относительно несущего атмосферного воздуха [86]. При переносе газообразных примесей наблюдается диффузионный размыв, ширина области которого пропорциональна \sqrt{Dt} , где t – время с момента введения примеси, а D – коэффициент диффузии. В связи с этим скорость переноса при фильтрации оказывается меньше, чем средняя скорость потока. Кроме того, диффузионный размыв происходит значительно быстрее, чем это предсказывает теория диффузии, и с разной скоростью вдоль и поперек потока. Отставание газообразной примеси от несущего ее воздушного потока в пористой среде обрушенной зоны объясняется явлением адсорбции [83]. Молекулы растворенной в атмосферном воздухе газообразной примеси могут временно закрепляться (адсорбироваться) на поверхности пор. Между раствором и поверхностью устанавливается динамическое равновесие, и среднее количество адсорбированного вещества зависит от его концентрации в растворе. Таким образом, в среднем некоторая доля содержащейся в пористой среде примеси не движется вовсе, поэтому средняя скорость примеси меньше скорости жидкости.

Причиной ускоренной диффузии в пористой среде является особая геометрия пор (разброс размеров пор и изменение этих размеров от точки к точке пористой среды). В результате скорость жидкости испытывает резкие флуктуации. Поэтому при одинаковой средней скорости примесь переносится с разной скоростью по различным путям.

Перенос газообразной примеси через пористую среду обрушенной зоны осуществляется за счет конвективного и диффузионного механизмов [13]. Вли-

яние на газоперенос молекулярной диффузии по сравнению с турбулентной определяется режимом движения воздуха в обрушенной зоне. Процесс конвективной диффузии в пористой среде обрушенной зоны для случая, когда коэффициент диффузии является функцией координат, описывается уравнением в проекциях на оси координат [13]

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + w \frac{\partial c}{\partial y} + v \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right), \quad (2.23)$$

где D_x , D_y , и D_z – суммарные коэффициенты диффузии соответственно в направлении осей Ox , Oy , Oz .

Выражение (2.23) является полным уравнением конвективно-диффузионного переноса газа утечками воздуха в обрушенных зонах.

Решение уравнения (2.23) предполагает задание скоростей фильтрации u , v , w , коэффициента диффузии D .

В случае, когда в объеме пористой среды обрушенной зоны есть источники и стоки газа, в правой части уравнения (2.23) добавляются интенсивности источников f_1 и стоков f_2 как функций координат. Уравнение конвективно-диффузионного переноса газа потоками воздуха в обрушенных зонах, в этом случае, имеет следующий вид [13]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + w \frac{\partial c}{\partial y} + v \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + (f_1 - f_2). \quad (2.24)$$

Для решения уравнения (2.24) и его интегрирования необходимо задавать соответствующие граничные условия.

В случае плоского конвективно-диффузионного переноса газа, который имеет место в пористой среде обрушенной зоны, $\partial c / \partial t = 0$; $u = w = 0$; $D_x = 0$ и уравнение (2.24) принимает вид [13]

$$v \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + (f_1 - f_2). \quad (2.25)$$

Т.е. в рассматриваемом случае имеет место конвективный перенос по оси Oz – направление движения воздушного потока (левая часть уравнения) и диффузионный перенос по осям Oy и Oz (первые два члена в правой части уравнения).

Если можно пренебречь диффузионным переносом в направлении основного движения в сравнении с конвективным, уравнение (2.25) упрощается [13]:

$$v \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + (f_1 - f_2). \quad (2.26)$$

Рассмотрим перенос газа в обрушенной зоне при производстве взрывных работ в камерах смежных с обрушенной зоной и всасывающем способе проветривания при условии, что источником поступления газов является смежная с обрушенной зоной камера ($f_1 = q' f_2 = 0$), а коэффициент диффузии есть постоянная величина, среднее значение которой $D_z = \bar{D} = \text{const}$ уравнение (2.26) примет вид

$$v \frac{\partial c}{\partial z} = \bar{D} \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + q' \quad (2.27)$$

Если известно частное решение уравнения (2.27) $\bar{c} = \bar{c}(y)$, среднее в диапазоне $0 < z < L_{з.о.}$, где $L_{з.о.}$ – толщина зоны обрушения, то можно получить приближенное его решение, которое позволяет оценить производную $\partial^2 c / \partial y^2$ через значение $\partial^2 \bar{c} / \partial y^2$, среднее по диапазону изменения z . В этом случае уравнение (2.27) запишется как

$$v \frac{dc}{dz} = \bar{D} \frac{d^2 \bar{c}}{dy^2} + q', \quad (2.28)$$

где правая часть - величина постоянная. При интегрировании (2.28)

$$c = \frac{1}{v} \left(\bar{D} \frac{d^2 \bar{c}}{dy^2} + q' \right) z + c_{\kappa}, \quad (2.29)$$

где c_{κ} – содержание газа в воздушном потоке, поступающем в обрушенную зону со смежной камеры (при $v = 0$);

$$v = \frac{q_{ym}}{b_{з.о.}},$$

где q_{ym} – утечки воздуха с единицы длины горной выработки;

$b_{з.о.}$ – ширина зоны обрушения.

Величину коэффициента диффузии в формуле (3.35) можно принимать по данным экспериментов или оценить по формуле для среды, состоящей из шаровых частиц [13]

$$\bar{D} = 0,08dv,$$

где d – диаметр частиц.

2.5.2 Влияние сорбционной способности горных пород на перенос газа в обрушенной зоне

Как известно [83], при переносе газа в пористой среде существенное значение имеют сорбционные процессы. Влияние сорбированного газа на характеристики процесса переноса может быть весьма ощутимым в условиях линейной фильтрации, которую с учетом сорбционного обмена в пористой среде обрушенной зоны можно описать следующей системой уравнений:

$$m \frac{\partial \rho}{\partial \tau} = -\text{div} \bar{u} + \beta; \quad \bar{u} = -\frac{k}{\mu} \text{grad } P, \quad (2.30)$$

где u – скорость фильтрации; β – величина, характеризующая сорбционный массообмен.

Поглощение газа частицами породы пористой среды происходит следующим образом [71, 88]: вначале идет процесс осаждения молекул на поверхности, а затем происходит их диффузия внутрь частиц породы. Процесс диффузии является медленным процессом и поэтому является ограничивающим фактором, следовательно процесс сорбции газа можно рассматривать как диффузию внутрь частиц горной породы, а кинетику поверхностей сорбции учитывать граничными условиями.

Для расчета диффузии молекул газа в твердом теле, используем одномерное уравнение диффузии

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}, \quad 0 < x < F, \quad (2.31)$$

где F – размер области диффузии;

M – масса сорбированного газа в единице объема пористой среды.

Начальное условие принимаем в следующем виде

$$M(0, x) = M_1. \quad (2.32)$$

Молекулы газа, проникают в породу через ее поверхность, которая имеет координату $x = F$, в связи с чем в сечении $x = 0$ имеем условие

$$\frac{\partial M}{\partial x}(t, 0) = 0 \quad (2.33)$$

Молекулы газа оседают на поверхность частицы породы в сечении при $x = F$. В равновесных условиях $M_0 = a(P)$, где $a(P)$ – изотерма сорбции. При $x = F$ с учетом кинетического характера процесса сорбции, условие можно записать в следующем виде

$$\frac{\partial M}{\partial t} = - \frac{M - a(P)}{T} \Big|_{x=F}, \quad (2.34)$$

где T – текущее время процесса сорбции.

Поток при массообмене между свободным и сорбированным газом определится из выражения [83]

$$Q = -D \frac{\partial M(F, t)}{\partial x} \quad (2.35)$$

Величина β связана с величиной Q соотношением [25]

$$\beta = f(1 - K_{II})Q, \quad (2.36)$$

где f – удельная площадь поверхности пористой среды;

Уравнения (2.30) – (2.36) являются полной замкнутой системой фильтрации газа с учетом сорбции.

С целью решения задачи определения для потока $Q(t)$ явного выражения из равенства (2.35) применим преобразование Лапласа с параметром σ .

С учетом промежуточных преобразований выражение для потока \bar{Q} будет иметь следующий вид:

$$\bar{Q} = \frac{\sqrt{\sigma D}}{1 + \sigma t} \tau h \left(\sqrt{\frac{\sigma}{D}} F \right) \left(\bar{a} - \frac{M_1}{\sigma} \right) \quad (2.37)$$

где \bar{a} – изображение функции $a[P(t)]$.

Из уравнения (2.37) следует, что поток $Q(t)$ равен

$$Q(t) = - \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t \Phi(t - \theta) \{a[P(\theta)] - M_1\} d\theta, \quad (2.38)$$

где $\Phi(t)$ – ядро.

Используя выражения (2.30) и (2.36), а также с учетом (2.38), уравнение фильтрации идеального газа с учетом сорбции имеет вид

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{m\mu} \frac{\partial}{\partial z} \left(P \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \frac{fP_0(1-m)}{m\rho_0} Q(t) \quad (2.39)$$

Так как изотерма сорбции линейная, то $a(P) = aP$.

После линеаризации, с учетом (2.38) получим

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{kP_{cp}}{m\mu} \frac{\partial^2 P^2}{\partial z^2} - \frac{faP_0(1-m)}{m\rho_0} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{\tau} \Phi(t-\theta) [P^2(\theta, z) - P_1^2] d\theta ;$$

где P_1, P_{cp} – начальное и среднее давление соответственно.

2.6. Выводы.

Основными результатами исследований выполненных в настоящем разделе сводятся к следующему:

- выполнен анализ фильтрационных течений в трещиновато–пористых средах зон обрушения горных пород, свидетельствующий о явлении взаимодействия потоков фильтрации утечек воздуха с пористой структурой зоны обрушений и находящимися в ней газообразными вредными примесями, образовавшихся в результате ведения взрывных работ;

- произведена схематизация геометрической формы движения, которая позволяет создать расчетные схемы, учитывающие основные эффекты и позволяющие определить параметры течения при изучении фильтрационных потоков воздуха в обрушенном массиве горных пород;

- обоснована физическая модель–схема одномерных фильтрационных потоков при установившихся и неустойчивых режимах движения позволяющая обеспечить адекватное математическое описание процесса миграции флюидов в обрушенном массиве горных пород;

– на основании выполненных теоретических исследований предложены математические модели процесса фильтрации воздуха в аэродинамически активных зонах обрушения горных пород, позволяющие с учетом общей теории движения газов в пористых средах, сформулировать закономерности и методы, справедливые для явлений взаимодействия фильтрационных потоков с поровым пространством обрушенной породы, имеющих место в разрушенном горном массиве;

– установлены основные закономерности фильтрационного движения воздуха через аэродинамически активные зоны обрушений рудников Кривбасса при прямолинейно–параллельном и плоскорадиальном потоке, с учетом свойств пористой среды и режима движения газа в ней.

- показано, что на перенос газовых примесей в пористой среде существенное значение имеют сорбционные процессы, получено уравнение фильтрации идеального газа через пористую среду с учетом сорбции, позволяющее рассчитывать газовыделение из обрушенной зоны в окружающие выработки вследствие изменения давления в выработках.

Выполненные в данной главе теоретические исследования свидетельствуют о том, что в результате фильтрационных процессов протекающих в обрушенных пространствах, при определенных обстоятельствах, могут возникнуть условия способствующие изменению основных параметров рудничной атмосферы в горных выработках шахты.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗОВ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ОБРУШЕННЫХ ЗОН

3.1. Параметры определяющие режим фильтрации в обрушенных зонах.

Определение режима фильтрации газа в пористой среде обрушенных зон имеет большое теоретическое и практическое значение, так как без знания закона фильтрации в пористой среде обрушенных зон, особенно вблизи горных выработок, нет возможности рассчитать фильтрационные потоки воздуха, их изменения во времени, при различных условиях проветривания горных выработок, а также определить параметры обрушенных зон (проницаемость, пористость и др.).

Известно, что режим фильтрации определяется числом Re , которое является также критерием применимости линейного закона фильтрации [89].

Для определения границ применения линейного закона фильтрации через зоны обрушения находят зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления λ от числа Рейнольдса по формуле [25]

$$Re = \frac{4\nu\rho\sqrt{2K}}{\mu K_{II}\sqrt{K_{II}}},$$

а коэффициента аэродинамического сопротивления λ из формулы

$$\lambda = \frac{8K_{II}\Delta P\sqrt{2KK_{II}}}{L\rho v^2},$$

где K_{II} – коэффициент пористости исследуемой среды;

ρ и μ – плотность и вязкость газа соответственно;

v – скорость линейной фильтрации, см/с;

ΔP – перепад давления, Па;

K – коэффициент проницаемости пористой среды, определяемый экспериментально при ламинарном режиме течения.

L – длина (или толщина слоя) пористой среды, м.

Наиболее общей формой определения границ действия законов сопротивления при фильтрации газа является графическое задание коэффициента сопротивления как функции числа Рейнольдса по данным опыта.

На основании метода размерностей, который позволяет установить вид функциональной зависимости между параметрами, определяющими фильтрацию газа, можно получить [57]

$$\frac{\Delta Pl}{L\rho v^2} = \varphi\left(\frac{\mu}{\rho vl}\right), \quad (3.1)$$

где l – характерный линейный размер площади фильтрации.

В правой части уравнения (3.1) стоит величина обратная числу Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{\rho vl}{\mu} = \frac{vl}{\nu}. \quad (3.2)$$

В левой части уравнения (3.1) стоит безразмерная величина, называемая коэффициентом сопротивления при трении f .

$$f = \frac{\Delta Pl}{L\rho v^2}. \quad (3.3)$$

При подстановке (3.2) и (3.3) в (3.1) получается

$$f = \varphi(\text{Re}), \quad (3.4)$$

откуда следует, что коэффициент сопротивления есть функция числа Re .

Недостаток метода определения режима фильтрации по числу Re или графическим путем из зависимости $\lg f$ от $\lg Re$ состоит в том, что он не дает гарантированных результатов. При составлении графика возникают значительные трудности при вычислении значений Re и f , так как число Рейнольдса и коэффициент сопротивления зависят от характерного линейного размера площади фильтрации или порового диаметра, который не может быть строго определен, потому, что его определение осуществляется на основе ряда допущений и предположений теории гидравлического радиуса [57].

При движении через пористую среду газ испытывает два вида сопротивления [77, 89, 91]: от внутреннего трения между частицами газа и от внешнего трения частиц газа о стенки частиц материала слагающих пористую среду. Вследствие бесконечной малости первого вида сопротивления им можно пренебречь. При малых скоростях движения газа в пористой среде сила сопротивления выражает действие лишь вязкостных сил и пропорциональна первой степени скорости, т.е. имеет место линейный закон сопротивления. Если же скорость движения газа высокая, то в потоке газа возникают инерционные силы в результате действия которых, сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости газа. В этом случае проявляется квадратичный закон сопротивления.

Выведенная Дарси формула [32] устанавливает линейный закон фильтрации

$$v = \frac{Q}{F} = \frac{K_{\phi}}{\gamma} \frac{\Delta P}{L}, \quad (3.5)$$

где Q – объемный расход жидкости в единицу времени, $\text{м}^3/\text{с}$;

γ – удельный вес фильтрующегося газа;

F – площадь фильтрации, м^2 ;

K_{ϕ} – коэффициент фильтрации.

Между коэффициентом фильтрации K_{ϕ} и коэффициентом проницаемости пористой среды K существует связь [89]

$$K_{\phi} = K \frac{\gamma}{\mu}. \quad (3.6)$$

С учетом (3.6) формулу Дарси (3.5) можно выразить через проницаемость пористой среды

$$v = \frac{Q}{F} = \frac{K}{\mu} \frac{\Delta P}{L}. \quad (3.7)$$

Наиболее распространенной формой выражения закона сопротивления при фильтрационном течении, пропорциональной второй степени скорости, является уравнение Жаворонкова [55] полученное на основании, известного в гидравлике, уравнения Дарси-Вейсбаха

$$\Delta P = \left(\frac{2f\gamma}{d_{\phi}g} \right) Lv^2, \quad (3.8)$$

где d_{ϕ} – эквивалентный диаметр канала пористой среды;
 g – ускорение силы тяжести.

Если выразить формулу (3.5) относительно ΔP

$$\Delta P = \left(\frac{\gamma}{K_{\phi}} \right) Lv, \quad (3.9)$$

то при сравнении (3.9) с (3.8) видно, что оба выражения имеют в своем составе параметры, характеризующие фильтрационные свойства пористой среды и фильтрата, которые являются постоянным коэффициентом сопротивления, а также показатель степени при скорости фильтрации v [89].

При вводе соответствующих обозначений, получается одно общее уравнение для двух режимов фильтрации [89]

$$\Delta P = rLv^n,$$

где r – удельный коэффициент сопротивления, зависящий от режима фильтрации;

n – показатель степени, определяющий режим фильтрации и поэтому является показателем режима движения флюида.

Показатель режима движения флюида n может изменяться в пределах от 1 до 2, в зависимости от существующего режима движения если $n = 1$, то режим движения ламинарный, а если $n = 2$, то турбулентный. Все значения n между 1 и 2 определяют неустойчивый переходной режим.

Если перейти к общему сопротивлению пористой среды изменяющейся в зависимости от ее длины L и площади фильтрации F , то выражение (3.4) можно представить в следующем виде [57]:

$$\Delta P = RQ^n, \quad (3.10)$$

где R – аэродинамическое сопротивление всего пористого слоя.

Показатель режима движения n определяется по известным ΔP и v из уравнения [89]

$$n = \frac{d(\lg \Delta P)}{d(\lg v)}. \quad (3.11)$$

Коэффициент сопротивления r , в зависимости от режима фильтрации, можно определить на основании известных параметров ΔP , v , n и L .

Формула (3.10) нашла довольно широкое применение в практических и исследовательских работах, так как имеет сравнительно небольшое число переменных, относительно проста и обладает достаточной точностью при определении значений параметров. Одним из важных достоинств формулы является также то, что на основе уравнения (3.11) она позволяет определять режим движения флюида при фильтрации его в пористой среде [89].

3.2. Основные параметры пористой среды обрушенных зон влияющие на режим фильтрации газа.

Газопроницаемость горных пород – это способность пропускать сквозь себя газ. Газопроницаемость характеризуется коэффициентом проницаемости.

Для характеристики проницаемости пористых сред введены понятия абсолютной, эффективной и относительной проницаемости [49, 92].

Применительно к условиям фильтрации газов через обрушенные зоны Криворожского бассейна в большинстве случаев значения эффективной и абсолютной проницаемости практически совпадают за исключением переизмельченных пород повышенной влажности [25], поэтому далее используется термин проницаемость, под которым понимается эффективная газопроницаемость обрушенных горных пород.

Коэффициент проницаемости K определяется на основании линейного закона скорости фильтрации [77]

$$v_{\phi} = K \frac{\Delta P}{\mu \Delta L} \quad (3.12)$$

$$K = \frac{\mu \Delta L}{\Delta P} v_{\phi},$$

где v_{ϕ} – скорость фильтрации, м/с;

Из уравнения (3.12) следует, что коэффициент проницаемости пористой среды K имеет размерность площади

$$[K] = L^2.$$

В зависимости от принятой системы единиц коэффициент проницаемости выражается в m^2 , cm^2 или в Дарси [45]. Размерность проницаемости показывает, что это чисто геометрическое свойство среды, косвенно определяющее размер

ее структуры. Единица проницаемости 1Д (дарси) характеризует фильтрацию жидкости вязкостью 1 сантипуаз через образец породы площадью 1 см² с расходом 1 см³/с при перепаде давления 1 кг/см² на 1 см длины образца.

При достижении значений числа Рейнольдса выше критического, т.е. когда имеет место увеличение скорости движения флюида в пористой среде, нарушается линейный закон фильтрации и происходит переход через неустойчивую зону к турбулентному режиму. С известной долей приближения [47, 90, 93] суммарный градиент давления при движении жидкости в порах породы будет равен сумме потерь от инерционных сил и от сил трения, т. е. формула для градиента давления будет иметь вид

$$\Delta P = \frac{2L\mu}{K} v_{\phi} + \frac{2L\rho}{K_T} v_{\phi}^2, \quad (3.13)$$

где K_T – коэффициент проницаемости пористой среды, определяемый экспериментально при турбулентном режиме течения.

Из формулы (3.13) следует, что при любой скорости движения теоретически существуют оба режима фильтрации или, иными словами, независимо от скорости движения жидкости или газа в порах пористой среды режим фильтрации является переходным. Однако при малых скоростях можно пренебречь вторым членом, и при очень больших, наоборот, первым. В пределе, когда второй член существенно мал по сравнению с первым и им пренебрегают, уравнение (3.13) переходит в закон Дарси, во втором случае – в закон при вполне сформировавшемся турбулентном режиме фильтрации. Поэтому двучленная формула, характеризующая падение давления на единицу длины при фильтрации жидкости или газа в пористой среде, независимо от режима движения их является более универсальной по сравнению с одночленными выражениями.

Все факторы, приводящие к отклонению закона фильтрации от линейного при увеличении скорости потока газа, зависят от структуры порового пространства. Таким образом, параметр турбулентности пористой среды K_T является ее

функцией. В свою очередь структура порового пространства обуславливается породообразующим материалом, его укладкой, цементирующим веществом и рядом дополнительных причин, влияющих на обычные характеристики пористой среды: проницаемость, пористость, эффективный диаметр зерна, средний радиус пор и т. д. Поэтому параметр турбулентности пористой среды непосредственно связан с характеристиками пористой среды. Таким образом, при фильтрации газа или жидкости в пористой среде в любом диапазоне чисел Re потеря давления характеризуется двучленной зависимостью. В первом, линейном члене зависимости (3.13) пористая среда характеризуется коэффициентом проницаемости. Во втором, квадратичном члене порода будет характеризоваться уже параметром турбулентности пористой среды [78].

Наиболее важными факторами, определяющими проницаемость отбитых руд и пород, является их гранулометрический состав и горное давление. Эти два фактора в основном и определяют степень проницаемости слоя той или иной отбитой руды. В очистных пространствах блоков железорудных шахт Криворожского бассейна отбитая руда находится под давлением, создаваемым собственным ее весом и весом вышележащих пород, достигающем 6 Мпа [68]. Под воздействием этого давления руда уплотняется, изменяются ее свободный объем, форма каналов между кусками и другие параметры, влияющие на проницаемость всего слоя руды. Кроме того, на проницаемость руд значительное влияние оказывает характер разлома ее кусков, обуславливающий различную микрошероховатость каналов, влажность руд, твердость породообразующих минералов, прочность на сжатие и изгиб и другие физико-механические свойства руд. На коэффициент проницаемости влияет микрошероховатость и конфигурация каналов, по которым происходит фильтрация газа.

Коэффициент проницаемости разных типов руд одинакового гранулометрического состава имеет разные значения [68]. Минимальную проницаемость имеют крепкие магнетитовые руды, коэффициент проницаемости которых колеблется в широких пределах (от 2800 до 87000 дарси). Коэффициент проницаемости определялся для руд, имеющих в своем составе не менее 20% мелкой

фракции размером от 7 мм и менее. Максимальную проницаемость имеют слабые гидрогематитовые форма кусков которых, более близка к шарообразной, чем у других типов руд.

Проницаемость руд, отбитых в различных условиях, колеблется в широких пределах так же, как и их гранулометрический состав, поэтому сравнивать проницаемость различных образцов руд весьма трудно. Однако при существующей в Криворожском бассейне технологии буровзрывных работ основные типы руд можно расположить в порядке увеличения их газопроницаемости следующим образом: мартитовая слабая, гидрогематито-мартитовая, мартитовая средней крепости, гидрогематитовая, мартитовая крепкая и весьма крепкая, магнетитовая крепкая [25].

В обрушенных пространствах железорудных шахт Криворожского бассейна горная порода испытывает от ее вышележащих слоев значительное давление, которое достигает 600 т/м^2 [25]. Под воздействием этого давления горная масса уплотняется, изменяются ее свободный объем, форма каналов между кусками и другие параметры, влияющие на проницаемость всего слоя пород. Поэтому большой практический интерес представляют исследования влияния давления на проницаемость обрушенных горных пород.

Изменение свободного объема и усадки различных типов горных пород можно с некоторым приближением принять пропорциональным изменению коэффициентов проницаемости. Резкое уменьшение проницаемости отбитых руд происходит при изменении давления от $9,81 \cdot 10^4$ до $20 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ [25]. При дальнейшем увеличении давления коэффициент проницаемости снижается значительно медленнее и при давлении более $50 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ значение его практически можно принимать постоянным для каждого типа руд. Уменьшение свободного объема руд при давлении более $50 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ происходит интенсивнее, чем изменение проницаемости отбитых руд в этом диапазоне давления.

Анализ результатов исследований [25] свидетельствует о том, что при давлениях на кусковой материал в интервале от $9,81 \cdot 10^4$ до $20 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ происходит незначительное изменение гранулометрического состава за счет некото-

рого увеличения процентного содержания наиболее мелких фракций, образующихся в результате истирания кусков и отламывания мелких частиц с их поверхности. В этот же период происходят наиболее интенсивная усадка слоя руды, уменьшение свободного объема и, как следствие этого, резкое изменение проницаемости образца. При дальнейшем увеличении давления происходит существенное изменение гранулометрического состава образцов за счет уменьшения процентного содержания наиболее крупных фракций и значительного увеличения фракций средней крупности. Увеличивается также содержание наиболее мелких фракций, но в меньшей степени, чем средних. Увеличение нагрузок до $9,81 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ приводит к дальнейшему росту процентного содержания наиболее мелких фракций, что обусловлено раздавливанием отдельных кусков руды, попавших в область пиковых нагрузок. Процесс этот является затухающим в данном интервале давлений, так как по мере усадки материала происходит выравнивание пиковых нагрузок, и давление распределяется более равномерно по площади образца.

Для выяснения зависимости пористости от давления, рассмотрим вопрос о напряжениях, действующих в пористой среде обрушенных зон.

Масса горных пород создает горное давление $p_{горн}$, которое обычно можно считать неизменным после процесса их сдвижения и образования зон обрушения. Горное давление в зоне обрушения определяется по формуле [25]

$$p_{горн} = \rho_{горн} g H,$$

где $\rho_{горн}$ – средняя плотность горных пород, слагающих обрушенное пространство;

H – глубина точки определения давления вышележащих пород.

При увеличении H давление p возрастает, и напряжение в скелете обрушенных пород возрастает. Изменение пористости обусловлено изменением p . При возрастании давления увеличиваются усилия, сжимающие каждый из кусков породы, поэтому уменьшается их объем, а также объем пор. Поверхность

контактов между кусками увеличивается, происходит уплотнение частиц породы, возможна также перегруппировка кусков породы, разрушение цементирующего вещества и самих кусков, дробление кусков и т.д.

Вследствие малой деформации твердой фазы считают, что изменение пористости зависит от изменения давления линейно. Закон сжимаемости породы записывают следующим образом, вводя коэффициент упругости пористой среды [22] зоны обрушения β_0

$$\beta_0 = \frac{dV_{\Pi}}{V dp},$$

где dV_{Π} - изменение объема пор в элементе обрушенной зоны, имеющем объемом V , при изменении давления на величину dp .

Если объем элемента обрушенной зоны считается неизменным, то [22]

$$\frac{dV_{\Pi}}{V} = d\left(\frac{V_{\Pi}}{V}\right) = dm,$$

и закон сжимаемости породы примет вид

$$dK_{\Pi} = \beta_0 dp. \quad (3.14)$$

Интегрируя выражение (3.14), в конечной форме получим

$$K_{\Pi} = K_{\Pi 0} + \beta_0(p - p_0),$$

где $K_{\Pi 0}$ - коэффициент пористости при $p = p_0$.

При значительных изменениях давления изменение пористости описывается уравнением [22]

$$K_{\Pi} = K_{\Pi 0} e^{-\beta_0(p - p_0)/K_{\Pi 0}}.$$

Экспериментально показано, что не только пористость, но и проницаемость существенно меняется с изменением давления, причем часто проницаемость изменяется в более сильной степени, чем пористость. При малых изменениях давления эта зависимость может быть принята линейной:

$$K = K_0[1 + a(p - p_0)],$$

а при больших – экспоненциальной:

$$K = K_0 e^{\alpha(p - p_0)}.$$

В трещиноватых породах проницаемость изменяется в зависимости от давления интенсивнее, чем в пористых и определяется по выражению [33, 74]

$$K_{TP} = K_{TP0} [1 - \beta(p_0 - p)]^3, \quad K_{TP0} = 82 \cdot 10^9 \alpha G \delta_0^2.$$

3.3. Методика экспериментальных исследований.

В результате исследований режимов фильтрации газов в пористой среде обрушенных зон должно быть установлено:

- характер изменения режимов фильтрации газов в зависимости от гранулометрического состава пористой среды;
- фильтрационные свойства пористой среды обрушенной зоны;
- качественные и количественные характеристики процесса фильтрации газа через пористые среды с различными свойствами.

Так как в реальных условиях проводить обширные аэрогазодинамические эксперименты для установления фильтрационных характеристик пористой среды обрушенных зон сложно по техническим причинам, дорого и небезопасно, то целесообразно было провести их в лабораторных условиях.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории на установке (рис. 3.1), основными узлами которой являются: модель пористой среды 1, микроманометр для измерения перепада давления на участке пористой среды 2, ротаметры с регулирующими вентилями 3, камера для выравнивания величины разрежения 4, вакуум-насос Комовского 5, воздуховод 6, пневмометрические трубки Пито 7, компенсационная камера 8, решетка 9.

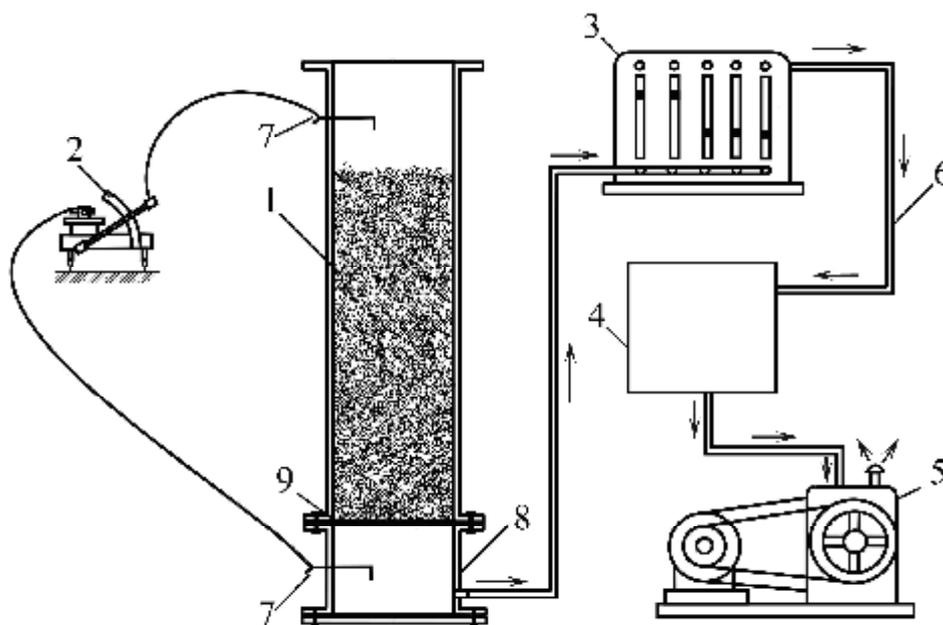


Рисунок 3.1 – Схема установки для определения режима движения воздуха.

В основу экспериментальных исследований положен динамический метод, основанный на измерении скорости воздуха, протекающего через установку и перепада давления между двумя точками (начальный и конечный участки цилиндрической части установки заправленной частицами горной породы). При этом определялись характеристики процесса фильтрации.

Модель пористой среды представляет собой железный цилиндр с внешним диаметром 320 мм и внутренним 300 мм, длиной 1000 мм и полезной емкостью 50 л. С обеих сторон цилиндр перекрыт сетками с ячейками 1 мм, чтобы предотвратить высыпание материала.

Железный цилиндр служит емкостью, в которую загружается порода, однородная по крупности, или смеси различного гранулометрического состава.

В модели использовалась порода, отобранная непосредственно в производственных условиях, чем достигалось аэродинамическое подобие воздушных потоков, движущихся по обрушенному пространству, при условии равенства скоростей движения воздуха в модели и натуре. Горные масса обрушенных зон Криворожского бассейна, как правило, представлена большей частью смесью руды с пустыми породами [94]. Через загруженные в цилиндр частицы породы, вакуум-насосом снизу отсасывался воздух в разных количествах и при различных разрежениях. Вся установка была достаточно герметизирована. Внутренние размеры цилиндра были выбраны с таким расчетом, чтобы исключить влияние стенок на скорость движения воздуха через насыпку. Для этого выдерживалось отношение [55]

$$\frac{d_k}{D_{\text{ц}}} \leq 0,09,$$

где d_k – диаметр частиц породы, мм;

$D_{\text{ц}}$ – диаметр цилиндра, мм.

Расход воздуха в установке измерялся с помощью аспиратора 3 с регулирующими ротаметрами. Наличие компенсационной камеры 8 в основании цилиндра позволяло создавать прямолинейно-параллельный поток при фильтрации воздуха через рабочий цилиндр. Продувка образцов горных пород в рабочем цилиндре осуществлялась с помощью вакуум-насоса Комовского 5, работающего через камеру выравнивания величины разрежения 4, что позволяло создавать постоянство расхода воздуха при фильтрации через образцы горных пород в течении всей серии опытов. Величины перепада давления h по высоте рабочего цилиндра измерялись с помощью пневмометрических трубок Пито 7.

В первой серии опытов определялся режим фильтрации воздуха через одномерный слой частиц породы. Гранулометрический состав исследуемой горной породы подбирался на основании ситового анализа, в результате которого было получено восемь фракций пород крупностью $-45 +30 -30 +20 -20 +10, -10 +8, -8 +6, -6 +3, -3 +1, -1 +0.5$ мм. Такой фракционный выбор предусмот-

рен наличием ламинарного и турбулентного режимов движения воздуха в пределах варьирования измеряемых значений параметров (скорость воздуха, перепад давления) и гранулометрического состава породы.

Во избежание засорения поровых каналов мелкой пылью и искажения данных о режиме движения воздуха, все фракции пород перед началом продувки тщательно промывались водой и просушивались. При продувке каждого фракционного класса пород, одновременно устанавливалось влияние на режим движения воздуха толщины слоя загрузки и степень уплотнения, которая достигалась сдавливанием загруженной в цилиндр породы. Во второй серии опытов основной задачей являлось определение режима движения воздуха через смесь, различную как по составу входящих в нее фракций, так и по их процентному содержанию. Опыты проводились с двухкомпонентными смесями, а также были взяты смеси различных сочетаний и соотношений.

Для построения зависимости $h = \varphi(Q)$ в логарифмических координатах и определения тангенса угла наклона прямой к оси абсцисс, величина которого является показателем режима движения воздуха n , в каждом опыте изменялись скорость воздуха и перепад давлений. С целью обеспечения достаточной связи между измеряемыми значениями параметров было запланировано не менее пяти опытов.

3.4. Исследование режима движения воздуха через пористую среду в зависимости от ее гранулометрического состава.

При исследовании режимов движения воздуха в каналах в качестве критерия, определяющего характер течения, как правило, используется число Рейнольдса Re , определяемое по формуле [95]

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu},$$

где d – эквивалентный диаметр канала

Е. М. Минский [47], при исследовании фильтрации в пористых средах, для вычисления числа Рейнольдса получил следующую формулу:

$$\text{Re} = \frac{\rho v \sqrt{K}}{\mu}, \quad (3.15)$$

где K – коэффициент проницаемости пористой среды в см^2

При движении флюидов в пористой среде, как число Рейнольдса так и коэффициент сопротивления, зависят от характерного линейного размера площади фильтрации или порового диаметра, которые не могут быть строго определены, потому что их определение осуществляется на основе ряда допущений и предположений теории гидравлического радиуса [31]. Поэтому при определении режима фильтрации критическое число Рейнольдса не имеет точных значений. В этом случае целесообразней использовать в качестве критерия, определяющего режим фильтрации, показатель n , а там, где это возможно, оценивать характер движения и числом Рейнольдса.

Определение режима движения воздуха через пористую среду обрушенных зон является весьма важной первоочередной задачей, поскольку от ее решения зависит достоверность определения основных параметров фильтрации.

Режим движения воздуха через любой канал зависит от скорости, кинематической вязкости и величины площади поперечного сечения канала. Следовательно, режим движения воздуха через пористую среду зоны обрушения определяется также, гранулометрическим составом и физико-механическими свойствами материала. Как показали многие исследователи [32, 51, 90, 96], выражение для определения среднего диаметра пор d_{cp} идеального грунта, эквивалентного исследуемой породе, имеет вид

$$d_{cp} = 4 \sqrt{\frac{2K}{K_{II}}}, \quad (3.16)$$

где K_{II} – коэффициент пористости.

Если проницаемость пористой среды выразить в дарси, то формулу (3.16) можно представить как

$$d_{cp} = 5,714 \sqrt{\frac{K}{K_{II}}}, \quad (3.17)$$

где размер пор будет выражаться в микрометрах (м к м).

Найденный по этим формулам размер поровых каналов является осредненной или даже в какой-то степени условной величиной, так как естественная порода состоит из пор различных размеров, при этом вряд ли поры такой породы имеют цилиндрическую форму. Рассчитанный таким образом средний диаметр поры будет несколько меньше действительной величины в связи с тем, что при выводе формул (3.16), (3.17) длина пор естественной пористой среды принималась равной длине образца. В действительности же длина отдельного канала будет значительно больше, чем длина образца, так как поровый канал имеет, очевидно, существенную извилистость.

Многочисленные исследования образцов естественной пористой среды, отобранных из продуктивных горизонтов различных месторождений, показали, что средний диаметр поровых каналов, рассчитанный по приведенным выше формулам, колеблется от 1 до 25 мк [75]. Если принять $Q = \text{const}$, то гранулометрический состав пористой среды будет оказывать влияние на режим движения воздуха прямо пропорционально, т.е. чем меньше величина частиц породы, тем меньше величина поровых каналов, а, следовательно и сама пористость, и тем меньше будет величина показателя режима движения воздуха через пористую среду. Уменьшение величины поровых каналов может происходить не только за счет уменьшения крупности частиц пористой среды, но также и за счет внесения в состав из крупных частиц определенного количества мелких [94]. Поэтому режим движения воздуха в пределах скоростей, наблюдающихся в рудниках, должен зависеть как от крупности одномерных частиц породы, так и от объема мелких фракций, содержащихся в ней. В связи с вышеуказанным первоочередной задачей экспериментальных исследований является определе-

ние зависимости между режимом движения воздуха и гранулометрическим составом пористой среды заданной крупности путем продувки его на установке.

Пористость породы определялась в лабораторных условиях методом насыщения. Мерный сосуд емкостью 1 л заполняли испытываемой породой весом 500...600 г, после чего сосуд встряхивался для полной усадки до постоянного уровня. Затем породу насыщали водой так, чтобы ее уровень был значительно выше уровня поверхности породы. После 9...10 часов выдержки, при которой достигалось полное заполнение водой всех пор кусковатой породы, производился замер по шкале мерного сосуда и вычислялась пористость по выражению

$$K_{II} = \frac{A - B}{W} 100\%,$$

где A – взятый объем воды;

B – объем воды выше уровня пористого материала;

W – объем, занимаемый породой.

Проведенные исследования (табл. 3.1) по определению влияния гранулометрического состава пористой среды на режим движения воздуха в ней показали, что с уменьшением крупности горных пород снижается ее пористость и уменьшается показатель режима движения воздуха n .

Таблица 3.1 – Определение параметров режимов движения воздуха

Класс крупности, мм	Замеренные величины параметров			Величины, определенные на основании замеров						
	Q , м ³ /с	ΔP , Н/м ²	K_{II}	ν , м/с	n	$K \cdot 10^8$, м ²	Re	f	d_{cp} , мм	$K_T \cdot 10^6$
–45 +30	0,0011	1,000	0,543	0,016	1,97	22,65	0,48	0,969	14,7	123,89
	0,0018	2,77		0,026	1,98	13,53	0,62	0,752		159,64
	0,0025	5,38		0,035	1,99	9,70	0,74	0,635		189,76
	0,0032	8,86		0,045	2,0	7,59	0,84	0,558		215,14
	0,0039	13,28		0,055	2,0	6,18	0,92	0,505		237,72
	0,0046	18,50		0,065		5,30	1,01	0,461		260,41
–30 +20	0,0011	1,22	0,486	0,016	1,80	18,88	0,44	1,061	7,6	58,52
	0,0018	3,10		0,026	1,96	11,83	0,58	0,804		77,23
	0,0025	5,94		0,035	1,97	8,61	0,69	0,673		92,26
	0,0032	9,75		0,045	1,97	6,7	0,79	0,594		104,53
	0,0039	14,53		0,055	1,99	5,56	0,87	0,534		116,28
	0,0046	20,20		0,065		4,86	0,97	0,483		128,56

Продолжение таблицы 3.1

-20 +10	0,0011	2,24	0,448	0,016	1,5	11,21	0,34	1,377	4,67	27,71
	0,0018	4,85		0,026	1,65	7,48	0,46	1,011		37,74
	0,0025	8,41		0,035	1,70	5,91	0,57	0,813		46,93
	0,0032	12,93		0,045	1,71	4,97	0,68	0,690		55,3
	0,0039	18,24		0,055	1,78	4,35	0,77	0,603		63,27
	0,0046	24,50		0,065		4,06	0,88	0,532		71,72
-10 +8	0,0011	4,28	0,425	0,016	1,30	5,38	0,24	1,987	3,1	12,75
	0,0018	8,34		0,026	1,31	4,51	0,36	1,302		19,45
	0,0025	12,91		0,035	1,33	4,08	0,48	0,979		25,87
	0,0032	18,04		0,045	1,34	3,72	0,56	0,797		31,78
	0,0039	23,66		0,055	1,37	3,46	0,69	0,676		37,47
	0,0046	29,70		0,065		3,31	0,8	0,585		43,29
-8 +6	0,0011	5,71	0,407	0,016	1,16	4,25	0,21	2,236	2,8	10,23
	0,0018	10,35		0,026	1,25	3,6	0,32	1,459		15,68
	0,0025	15,71		0,035	1,30	3,24	0,43	1,098		20,83
	0,0032	21,78		0,045	1,31	3,01	0,53	0,886		25,82
	0,0039	28,38		0,055	1,32	2,85	0,63	0,744		30,75
	0,0046	35,30		0,065		2,78	0,73	0,638		35,86
-6 +3	0,0011	6,81	0,381	0,016	1,21	3,41	0,19	2,498	1,87	6,12
	0,0018	12,67		0,026	1,22	2,98	0,29	1,601		9,54
	0,0025	19,08		0,035	1,25	2,84	0,4	1,172		13,04
	0,0032	26,06		0,045	1,32	2,55	0,48	0,962		15,88
	0,0039	34,05		0,055	1,36	2,39	0,57	0,814		18,77
	0,0046	42,60		0,065		2,30	0,67	0,701		21,8
-3 +1	0,0011	11,62	0,362	0,016	1,00	2,09	0,15	3,192	1,25	3,2
	0,0018	19,41		0,026	1,10	1,92	0,23	1,995		5,12
	0,0025	28,06		0,035	1,13	1,79	0,32	1,476		6,92
	0,0032	37,24		0,045	1,15	1,74	0,4	1,164		8,77
	0,0039	47,00		0,055	1,22	1,7	0,48	0,966		10,57
	0,0046	57,50		0,065		1,71	0,57	0,814		12,55
-1 +0,5	0,0011	16,52	0,343	0,016	1,00	1,48	0,12	3,785	0,96	2,07
	0,0018	27,60		0,026	1,00	1,37	0,2	2,361		3,32
	0,0025	38,55		0,035	1,14	1,29	0,27	1,737		4,52
	0,0032	51,30		0,045	1,15	1,25	0,34	1,374		5,71
	0,0039	64,75		0,055	1,17	1,25	0,41	1,125		6,97
	0,0046	78,60		0,065		1,24	0,49	0,952		8,24

Коэффициент фильтрации K определялся по уравнению (3.7), задаваясь значениями Q и замеряя микроманометром 2 (рис. 3.1) соответствующие значения ΔP .

Замеры параметров приведенных в табл. 3.1 производились в следующих условиях: площадь фильтрации – $F = 0,07065 \text{ м}^2$; толщина слоя – $L = 0,8 \text{ м}$; тем-

пература воздуха – $t = 20^{\circ}\text{C}$; давление воздуха – $p = 101,2$ кПа; плотность воздуха – $\rho = 1,22$ кг/м³; вязкость воздуха – $\mu = 18,1 \cdot 10^{-6}$ Н·с/м².

На основании замеров получены аэродинамические характеристики пористых сред с различным гранулометрическим составом (рис. 3.2), представляющие собой графики зависимости ΔP от Q .

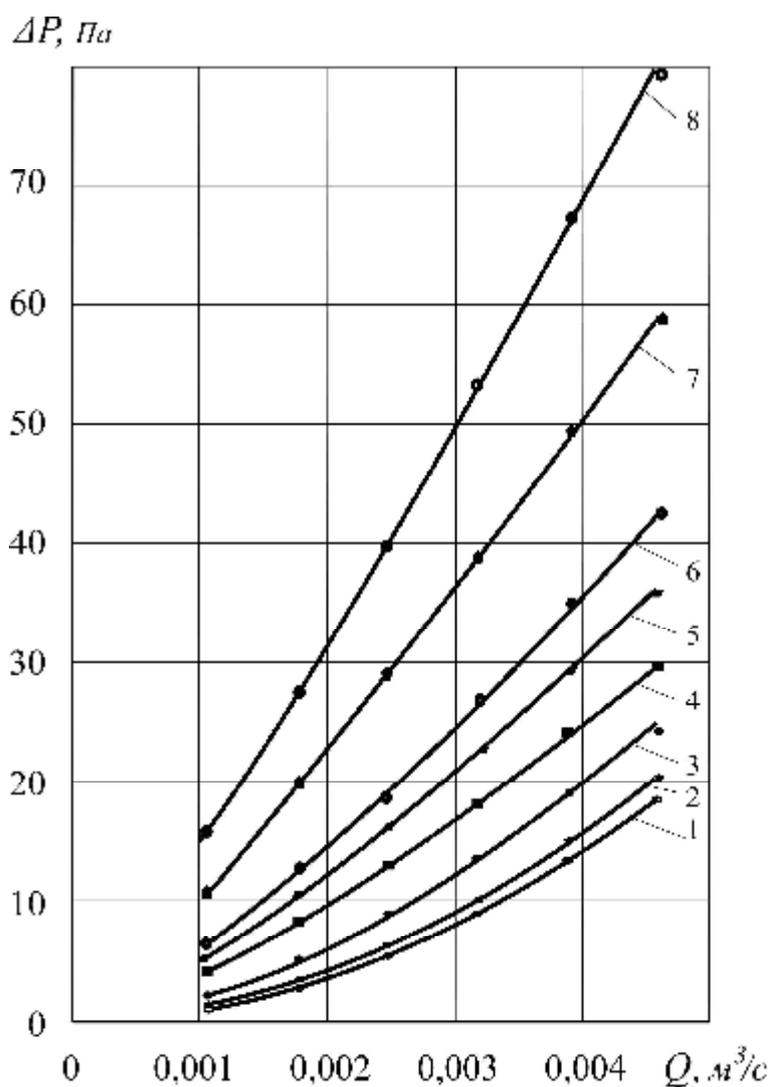


Рисунок 3.2 – Аэродинамические характеристики пористых сред с различным гранулометрическим составом: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 аэродинамические характеристики соответственно для классов крупности пород: -45+30 мм, -30+20 мм, -20+10 мм, -10+8 мм, -8+6 мм, -6+3 мм, -3+1 мм и -1+0,5 мм.

На основании зависимостей получены регрессионные уравнения для различных классов крупности горных пород:

$$\begin{aligned}
-45 + 30 & \Delta P = 849494Q^{1,99} \\
-30 + 20 & \Delta P = 689350Q^{1,93} \\
-20 + 10 & \Delta P = 24825650Q^{1,7} \\
-10 + 8 & \Delta P = 39351Q^{1,34} \\
-8 + 6 & \Delta P = 38439Q^{1,3} \\
-6 + 3 & \Delta P = 39750Q^{1,27} \\
-3 + 1 & \Delta P = 28309Q^{1,15} \\
-1 + 0,5 & \Delta P = 34395Q^{1,13}
\end{aligned} \tag{3.18}$$

Соотношения (3.18) можно рассматривать как зависимости, аппроксимирующие экспериментальные данные, и соответствующим образом трактовать входящие в них параметры как регрессионные коэффициенты.

Из уравнений (3.18) видно, что показатель степени при Q уменьшается с уменьшением крупности горных пород, следовательно режим фильтрации изменяется с изменением фракционного состава горных пород от турбулентного к ламинарному. С целью нахождения границы турбулентного и комбинированного режимов, в первую очередь исследовались крупные фракции породы. Опыты, проведенные с фракциями $-45 + 30$, $-30 + 20$ и $-20 + 10$ мм, показали, что такая крупность частиц пород в пределах расхода воздуха от $0,00106$ до $0,00459$ м³/сек. определяет турбулентный режим.

На рис. 3.3 представлены графики зависимости $\lg h$ от $\lg Q$, построенные для различных фракций.

Из графиков видно, что тангенс угла наклона прямых к оси абсцисс для фракций: $-45+30$ и $-30+20$ равен $2,0$. Что указывает на турбулентный режим для данного диапазона скоростей фильтрации воздуха. Для более мелких фракций режим движения в том же диапазоне расходов воздуха соответствует комбинированному. Так, для класса $-20 + 10$ мм показатель $n = 1,67$; $-10 + 8$ мм $n = 1,33$; $-8 + 6$ мм $n = 1,27$; $-6 + 3$ мм $n = 1,27$; $-3 + 1$ мм $n = 1,25$ и для класса $-1 + 0,5$ мм $n = 1,09$.

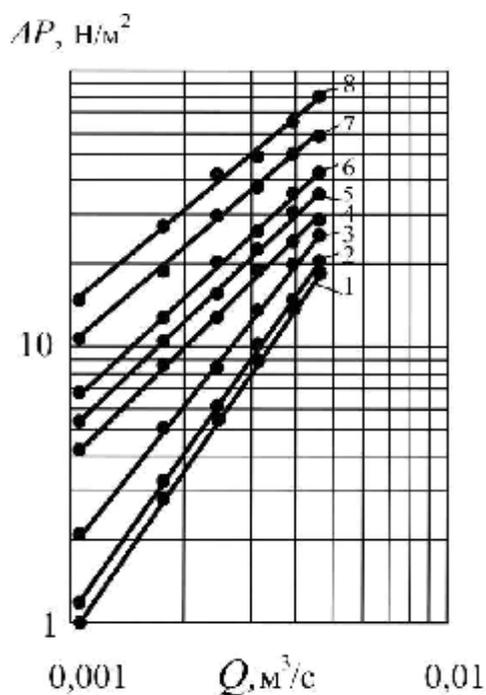


Рисунок 3.3 – Графики зависимости ΔP от Q для пористых сред с различным фракционным составом: 1 – с размером фракций $-45 +30$; 2 – с размером фракций $-30 +20$; 3 – с размером фракций $-20 +10$; 4 – с размером фракций $-10 +8$; 5 – с размером фракций $-8 +6$; 6 – с размером фракций $-6 +3$; 7 – с размером фракций $-3 +1$; 8 – с размером фракций $-1 +0,5$.

Таким образом, в пределах напоров опытов, границей турбулентного и комбинированного режимов на основании определенного значения n является крупность частиц, лежащая между фракциями $-30 +20$ и $-20 +10$ мм. Классы мельче $-1 +0,5$ мм испытанию не подвергались, потому что с ними уже проведены соответствующие исследования [40], показавшие, что для мелких классов характерен ламинарный режим. На основании опытных данных определялось число Re и коэффициент сопротивления f . Для расчета остальных параметров входящих в табл. 3.1 использовался метод М. Е. Минского [40, 47] и выражения (3.3), (3.5), (3.6), (3.11) и (3.15).

Результаты расчета по приведенным формулам (табл. 3.1) свидетельствуют о том, что величина коэффициента проницаемости K для крупных классов ($-45 +30$ до $-3 +1$ мм) непостоянна и меняется в зависимости от изменения Q и h , в особенности для турбулентного и близкого к нему режима движения воздуха

(при $n=2$) и почти не меняется для класса $-1 +0.5$ мм. Это объясняется тем, что коэффициент K является характеристикой пористой среды при ламинарном течении и применение его в уравнениях второго порядка не правомерно.

При стабильном показателе режима движения ($n=2$), число Re имеет двенадцать различных значений: от 0,44 до 1,01. Для каждой области комбинированного режима, характеризующегося показателем n , число Re изменяется в широких пределах. Более того, одинаковые значения числа Re встречаются в двух соседних, отличных друг от друга областях комбинированного режима. Например, для области с $n = 1,67$ и области с $n = 1,33$ имеется значение Re , равное в первом случае 4,06, во втором – чуть большим значением - 4,08.

Такой разброс чисел Re можно объяснить тем, что с одной стороны, с увеличением скорости движения воздуха в порах, увеличивается и значение числа Re , а с другой, с уменьшением класса крупности частиц породы, т. е. с уменьшением характерных размеров поровых каналов, уменьшается значение числа Re . С уменьшением крупности частиц породы снижается значение числа Re , а возрастание скорости в пределах одного и того же класса крупности частиц породы вызывает увеличение числа Re . В связи с вышеуказанным, возникают трудности при использовании числа Re в качестве критерия режима движения флюида в условиях пористой среды, в силу неопределенности его значений зависящих как от скорости фильтрации воздуха, так и от фракционного состава пород. Вероятно, для оценки режима движения флюида при фильтрации с помощью числа Re , необходимо более точно определять параметры, входящие в уравнение (3.2) (характерную скорость потока и его характерный размер).

Таким образом, использование показателя n в качестве критерия режима фильтрации позволяет более достоверно определять основные фильтрационные характеристики в зонах обрушения. Для определения влияния на фильтрационные характеристики пористой среды содержания мелких фракций породы исследовались двухкомпонентные смеси из пород различного гранулометрического состава: $-45 +30$ и $-1 +0.5$ мм (табл. 3.2).

Таблица 3.2 – Определение параметров режимов движения воздуха в пористой среде из двухкомпонентных составов горных пород

Содержание фракции -1+0,5 мм в фракционном составе -45+30 мм, %	Замеренные величины параметров		Величины, определенные на основании замеров				
	Q , м ³ /с	ΔP , Н/м ²	ν , м/с	n	$K \cdot 10^8$, м ²	Re	f
10	0,0011	22	0,016	1,50	1,138	0,11	4,321
	0,0018	48	0,026	1,65	0,760	0,15	3,174
	0,0025	83	0,035	1,70	0,60	0,18	2,551
	0,0032	127	0,045	1,71	0,504	0,22	1,750
	0,0039	180	0,055	1,78	0,441	0,25	1,894
	0,0046	242	0,065		0,406	0,28	1,669
20	0,0011	72	0,016	1,30	0,318	0,06	8,174
	0,0018	140,6	0,026	1,31	0,267	0,09	5,357
	0,0025	218	0,035	1,33	0,241	0,12	4,026
	0,0032	304	0,045	1,34	0,220	0,14	3,279
	0,0039	400	0,055	1,37	0,205	0,17	2,776
	0,0046	502	0,065		1,950	0,19	2,407
30	0,0011	167,5	0,016	1,14	0,141	0,04	12,276
	0,0018	301	0,026	1,18	0,124	0,06	7,866
	0,0025	446	0,035	1,19	0,116	0,08	5,812
	0,0032	601	0,045	1,21	0,110	0,10	4,628
	0,0039	769	0,055	1,25	0,105	0,12	3,876
	0,0046	946	0,065		0,104	0,14	3,302
40	0,0011	324	0,016	1,00	0,074	0,03	16,92
	0,0018	542	0,026	1,10	0,069	0,04	10,56
	0,0025	784	0,035	1,13	0,065	0,06	7,753
	0,0032	1040	0,045	1,15	0,063	0,08	6,124
	0,0039	1313	0,055	1,17	0,062	0,09	5,070
	0,0046	1594	0,065		0,062	0,11	4,287
50	0,0011	547	0,016	1,00	0,043	0,021	22,32
	0,0018	915	0,026	1,00	0,041	0,034	13,59
	0,0025	1277	0,035	1,00	0,040	0,048	9,812
	0,0032	1641	0,045	1,05	0,040	0,061	7,630
	0,0039	2028	0,055	1,07	0,040	0,075	6,249
	0,0046	2420	0,065		0,040	0,088	5,284

На рис. 3.4 приведены экспериментальные графики для двухкомпонентных смесей ($-45 + 30$ и $-1 + 0.5$ мм) в различных соотношениях (табл. 3.2).

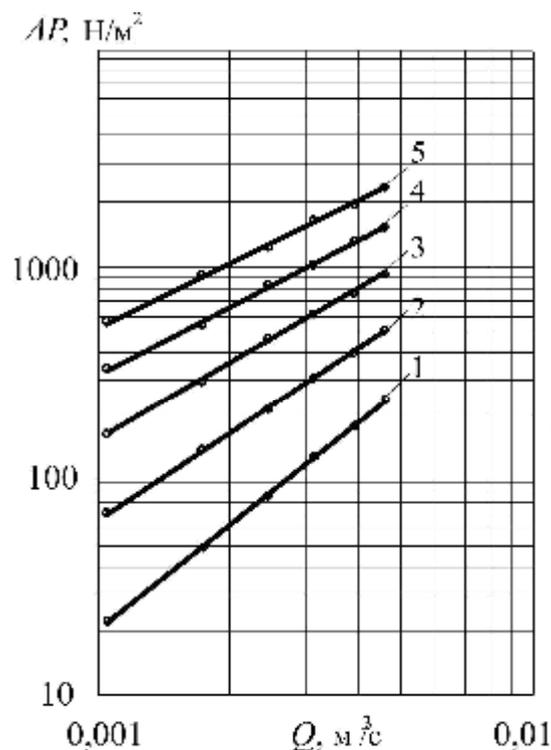


Рисунок 3.4 – Графики зависимости ΔP от Q в логарифмической координатной сетке для двухкомпонентных смесей $-45 + 30$ и $-1 + 0.5$ мм в различных соотношениях: 1 – 90 и 10%; 2 – 80 и 20%; 3 – 70 и 30%; 4 – 60 и 40%; 5 – 50 и 50%.

Из графиков (рис. 3.4) видно, что показатель режима движения воздуха через смесь, определяемый как тангенс угла наклона прямой, находится в прямой зависимости от объемного количества мелкой фракции в смеси.

При смешивании различных фракций основным условием является равномерное распределение мелких частиц породы среди крупных. Чем равномерней распределение, тем достоверней результаты по определению режима движения через двухкомпонентную смесь.

На основании результатов экспериментов получены графики изменения показателя режима движения воздуха через смеси из различного фракционного состава пород в зависимости от процентного содержания определяющего класса. На рис. 3.5 приведен график такой зависимости от объема определяющего фракционного класса $-1 + 0,5$ мм.

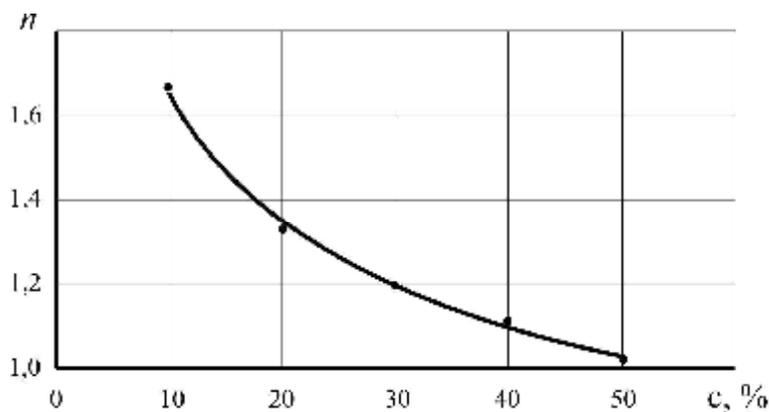


Рисунок 3.5 – График зависимости показателя режима фильтрации воздуха от объема определяющего класса $-1 + 0,5$ мм.

График показывает характер изменения режима фильтрации воздуха через двухкомпонентную смесь из фракций: $-45 + 30$ мм и определяющего $-1 + 0,5$ мм. Аппроксимация экспериментальных данных производилась уравнением вида $n = ac^b$. В результате математической обработки опытных данных была получена зависимость величины показателя режима фильтрации n от содержания в пористой среде мелких фракций породы c с достоверностью $R^2 = 0,9974$

$$n = 3,2843 \cdot c^{-0,2971}$$

3.5. Исследование влияния литологического состава горных пород на проницаемость пористой среды обрушенных зон и режимы фильтрации воздуха в них.

Рассмотрим влияние литологического состава и физико-механических свойств пород, слагающих пористую среду обрушенной зоны, на ее проницаемость. Это позволяет получить дополнительную информацию о факторах, определяющих закон сопротивления в пористой среде, и уточнить некоторые малоизученные вопросы фильтрации воздуха в пористых средах с различным литологическим составом горных пород.

Разрушенная горная масса в различных частях зоны обрушения весьма неоднородна. Так литологический состав поверхностного слоя обрушений, как

правило, резко отличается от литологического состава остальной части разрушенной горной массы [63]. Это связано с тем, что в поверхностный слой обычно попадает большее количество глинистого материала из наносов, а в дальнейшем этот слой подвергается активному разрушающему воздействию атмосферных агентов и солнечной радиации. В результате сопротивление поверхностного слоя может оказаться несравненно большим, чем сопротивление остальной части обрушения. Основной причиной повышенного сопротивления пористой среды поверхностного слоя зоны обрушения, является проникновение мелкодисперсных частиц горных пород в поровое пространство более крупной горной породы. При фильтрации жидкости с содержанием мелких взвешенных в ней частиц через пористую среду происходит как бы ее внутреннее засорение, в результате чего уменьшается фильтрационная способность данной пористой среды. Это явление получило название кольтматации [97].

Процесс кольтматации происходит при взаимодействии дисперсной фазы с дисперсионной средой кольтматирующих растворов, а также поровой поверхности породы с внутриводной средой, в результате чего снижается проницаемость пористой среды обрушенных зон, что оказывает существенное влияние на режим фильтрации.

Для оценки влияния литологического состава и физико-механических свойств пород, слагающих пористую среду обрушенной зоны, на ее проницаемость, были проведены исследования режимов фильтрации через пористую среду с добавлением в нее в различных соотношениях глины.

Результаты исследований (табл. 3.3) свидетельствуют о том, что при содержании глины в пористой среде в пределах 5% в опытных образцах при продувках имел место комбинированный режим фильтрации с показателем режима $n = 1,1 - 1,15$, а дальнейшее увеличение содержания глины до 25% по объему приводит к уменьшению показателя n и режим становится ламинарным с $n = 1,0$.

Таблица 3.3 – Определение параметров режимов движения воздуха в пористой среде заполненной глиной

Содержание глины, %	Замеренные величины параметров		Величины, определенные на основании замеров				
	Q , $\text{м}^3/\text{с}$	ΔP , $\text{Н}/\text{м}^2$	ν , $\text{м}/\text{с}$	n	$K \cdot 10^8$, м^2	Re	f
5	0,0011	42	0,016	1,10	0,539	0,07	6,278
	0,0018	73	0,026	1,11	0,517	0,12	3,846
	0,0025	106	0,035	1,12	0,500	0,17	2,798
	0,0032	141	0,045	1,14	0,482	0,21	2,214
	0,0039	178	0,055	1,15	0,467	0,25	1,841
	0,0046	215	0,065		0,457	0,3	1,575
10	0,0011	95	0,016	1,00	0,238	0,05	9,441
	0,0018	160	0,026	1,00	0,236	0,08	5,695
	0,0025	222	0,035	1,11	0,238	0,12	4,049
	0,0032	294	0,045	1,12	0,231	0,15	3,196
	0,0039	368	0,055	1,14	0,226	0,18	2,647
	0,0046	445	0,065		0,221	0,21	2,265
15	0,0011	204	0,016	1,00	0,111	0,03	13,835
	0,0018	342	0,026	1,00	0,110	0,06	8,326
	0,0025	478	0,035	1,00	0,110	0,08	5,942
	0,0032	612	0,045	1,10	0,111	0,10	4,612
	0,0039	765	0,055	1,12	0,109	0,12	3,816
	0,0046	922	0,065		0,106	0,14	3,261
20	0,0011	541	0,016	1,00	0,004	0,02	22,531
	0,0018	904	0,026	1,00	0,004	0,03	13,536
	0,0025	1262	0,035	1,00	0,004	0,05	9,655
	0,0032	1622	0,045	1,00	0,004	0,06	7,508
	0,0039	1987	0,055	1,00	0,004	0,08	6,150
	0,0046	2345	0,065		0,004	0,09	5,200
25	0,0011	1143	0,016	1,00	0,002	0,01	32,749
	0,0018	1910	0,026	1,00	0,002	0,02	19,675
	0,0025	2667	0,035	1,00	0,002	0,03	14,035
	0,0032	3428	0,045	1,00	0,002	0,04	10,915
	0,0039	4200	0,055	1,00	0,002	0,05	8,941
	0,0046	4950	0,065		0,002	0,06	7,555

На рис. 3.6 приведены графики зависимости $\lg \Delta P = f(\lg Q)$ для пористой среды с классом крупности - 10 + 8 мм при различном объемном содержании глинистых добавок (5...25%).

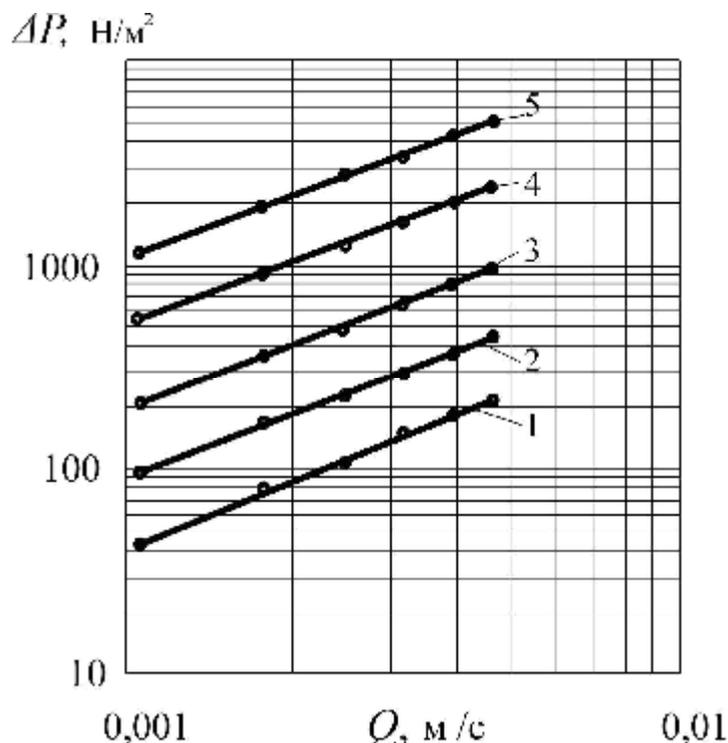


Рисунок 3.6 – Графики зависимости ΔP от Q при различном содержании глины в породе класса -10+8 мм:

1 – 5%; 2 – 10%; 3 – 15%; 4 – 20%; 5 – 25%.

На рис. 3.7 приведена зависимость проницаемости пористой среды от содержания в ней глинистых соединений.

Из графиков видно, что содержание глины в пористой среде оказывает значительное влияние на проницаемость пористой среды. Для поддержания постоянства расхода при продувке фракций пород с содержанием глины необходимо значительно повышать давление. Из-за глины проницаемость и, следовательно, размеры поровых каналов имеют пониженные значения.

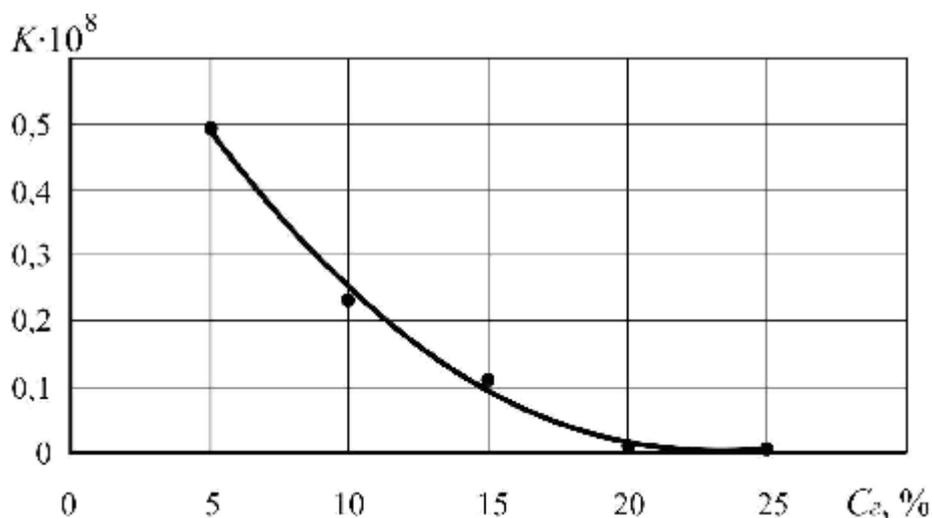


Рисунок 3.7 – Зависимость проницаемости пористой среды $K_{пр}$ от содержания в ней глинистых соединений C_g .

Из графика на рис. 3.7 видно, что при содержании глины 20% проницаемость пористой среды приближается к нулю, а 25 % и более наступает полная закупорка поровых каналов пористой среды.

При фильтрации газа через пористую среду, в которой кроме глины содержится еще и вода, возможно возникновение эффекта начального градиента давления [98]. Чем больше остаточная водонасыщенность и содержание глины, тем больше начальный градиент давления. При этом некоторое количество остаточной воды, не участвующей в основном движении жидкости в виде слоев, обволакивает частицы пористой среды перекрывающих (частично или полностью) поровые каналы, в связи с чем возникают нелинейные режимы фильтрации. При достаточно больших градиентах давления начинается перестройка этих слоев, сопровождающаяся изменением гидродинамического сопротивления пористой среды. В результате естественно ожидать непропорционально быстрого увеличения расхода фильтрующегося газа при росте перепада давления, т.е. закон фильтрации газа в среде, которая содержит слои связанной жидкости, обладающие упругостью, будет иметь вид, характерный для псевдопластичных неньютоновских жидкостей. В частности, если начальное содержание связанной жидкости настолько велико, что все поровые каналы в начальном состоянии перекрыты, то движение газа начнется только после того, как слои свя-

занной воды будут частично прорваны. В связи с этим в таких условиях возможно появление предельного (начального) градиента для фильтрации газа. Это может происходить при фильтрации газа в глинизированных породах, содержащих остаточную воду, поскольку вода образует с частицами глины коллоидный раствор, который обладает некоторой устойчивостью на сдвиг. Одной из причин, вызывающих нелинейность фильтрационного закона, может служить эффект гистерезиса угла смачивания.

Одной из причин проявления начального градиента давления при фильтрации воздуха в пористой среде обрушенных зон содержащих глинистые фракции и остаточную воду, может быть возникновение, так называемого “пузырькового эффекта Жамена” [98], при котором, для проталкивания образовавшегося пузырька газа через сужение порового канала, необходимо приложить дополнительную силу, равную силе деформирующей пузырьки при прохождении суженной части канала и изменяющей кривизну его поверхности. Возникающий при этом дополнительный перепад давления может быть оценен как σ/r_n (отношение напряжений деформации пузырька к его радиусу). Начальный градиент давления определяется гистерезисом краевого угла смачивания (разницей косинусов отступающего и наступающего краевых углов), т.е. начальный градиент зависит от степени деформации пузырька газа при его фильтрации.

В случае, когда литологический состав поверхностного слоя обрушенной зоны сформирован таким образом, что глинистый материал отсутствует, то обрушенная зона оказывается под непосредственным воздействием атмосферных осадков. Поверхностные воды, попадающие в зону обрушения из атмосферных осадков и водных бассейнов, а также влажный рудничный воздух, фильтрующийся через отбитую руду и обрушенные покрывающие породы, увлажняют их. Степень увлажнения в зависимости от водообильности в различные сезоны года может колебаться во времени в значительных пределах. Влага в поровых каналах оказывает влияние на величину депрессии и количество фильтрующегося воздуха.

Влажность породы это содержание в образце какого-то количества влаги, удаляемого из него высушиванием при температуре 105° до постоянного веса.

Влажность горных пород ω представляет собой отношение массы воды содержащейся в образце к массе сухой породы

$$\omega = \frac{G_B - G_C}{G_C}, \quad (3.19)$$

где G_B – масса влажного образца;

G_a – масса того же образца, высушенного при 105° .

Влажность можно выразить объемной влажностью, определяемой объемом воды, содержащейся во влажном образце. Для оценки влажности используется также коэффициент влажности, или насыщения k_ω характеризующий степень заполнения пор породы или грунта водой:

$$k_\omega = \frac{\omega \delta}{m}, \quad (3.20)$$

где δ – объемная масса сухого образца;

m – пористость образца.

Известно, что пористость породы m определяется как отношение суммарного объема пустот в породе V_{II} ко всему объему пород V т.е.

$$m = \frac{V_{II}}{V}. \quad (3.21)$$

Подставляя в (3.20) вместо ω и m выражения (3.19) и (3.21) получим

$$k_\omega = \frac{G_B - G_C}{V_{II}} \cdot \frac{\delta V}{G_C}.$$

Так как $\delta V = G_C$ то

$$k_\omega = \frac{G_B - G_C}{V_{II}} \quad (3.22)$$

Из уравнения (3.22) видно, что $k_w = 0$ соответствует абсолютно сухому материалу, а при $k_w = 1$ поры образца кусковатого материала полностью заполнены водой.

С целью установления влияния влажности пористой среды на фильтрацию воздуха были выполнены лабораторные исследования на той же установке.

В цилиндр производилась загрузка породы различной влажности через которую пропускаться поток воздуха при различных его расходах.

Экспериментальные работы были проведены с двумя гранулометрическими составами пород в отдельности: $-1 +0,5$ и $-6 +3$ мм, а также со смешанным составом из классов равных объемов фракций: $-1 +0,5$ и $-8 +6$ мм, загруженных в цилиндр после тщательного их перемешивания. Вначале порода засыпалась в цилиндр в сухом виде, после чего определялся вес породы, а затем производилась продувка фиксированными количествами воздуха с замером величины депрессии. Затем, породу извлекали и в нее добавляли 300–350 мл воды. После тщательного перемешивания вновь загружали в цилиндр.

Объем испарившейся воды в каждом опыте не превышал 2 мл.

После каждого измерения породу из цилиндра извлекали, в нее добавляли следующую порцию воды (225–450 мл) и опыты повторялись до насыщения пористой среды. Полное насыщение достигалось тем, что цилиндр, заполненный постоянным количеством породы, заливался полностью водой, затем производили выдержку до тех пор, пока часть воды стекала через конус и патрубок. Прекращение капеза свидетельствовало о том, что пористая среда освобождена от избыточной воды, которую не в состоянии удерживать в порах, т. е. является максимально увлажненной. Далее определялся вес максимально увлажненной породы и производилась продувка. Поры исследуемого класса пород удерживают до 10 % воды от полного их насыщения, что составляет 2260 мл при заполненном объеме цилиндра $V_{ц} = 0,05652 \text{ м}^3$, коэффициенте пористости $m = 0,34 \dots 0,4$ и вмещаемом количестве воды в порах при полном их насыщении 22600 мл.

На рис. 3.8 и в табл. 3.4 приведены результаты лабораторных исследований по фильтрации воздуха через пористую среду определенной фракции при различной влажности.

Из графика видно, что незначительное увлажнение пористой среды приводит к падению депрессии при одном и том же количестве фильтрующегося воздуха, что указывает на снижение аэродинамического сопротивления среды при некотором увлажнении пор в связи со снижением величины трения воздуха о поверхность частиц породы.

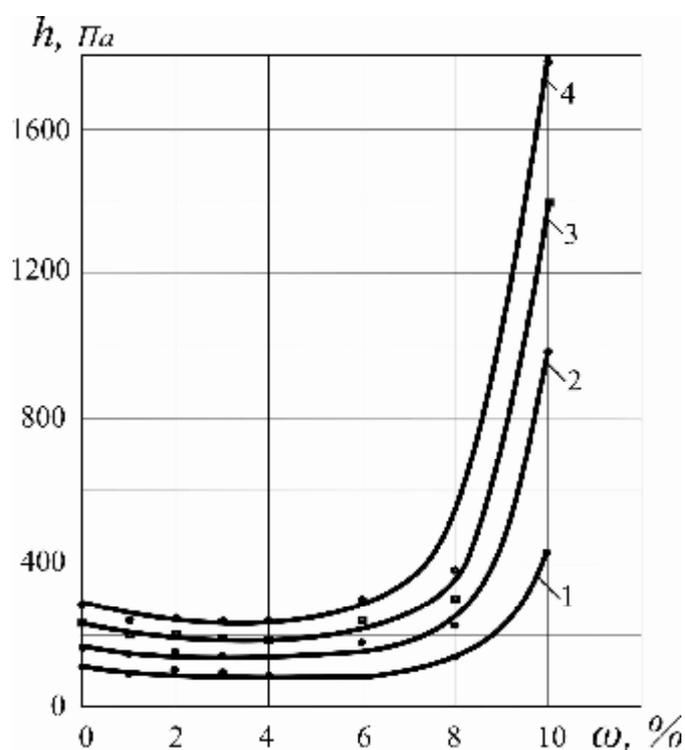


Рисунок 3.8 – Изменение депрессии в зависимости от влажности пористой среды из класса $-1 +0.5$ мм: 1 – при $Q = 0,004$ м³/с; 2 – при $Q = 0,006$ м³/с; 3 – при $Q = 0,008$ м³/с; 4 – при $Q = 0,01$ м³/с.

С возрастанием влажности сопротивление остается неизменным до определенного предела, а затем резко возрастает, что объясняется перекрытием одной части поровых каналов водой полностью и сужением водяным слоем другой части поровых каналов.

Таблица 3.4 – Депрессия h , Па, при фильтрации воздуха через пористую среду фракции $-1 +0.5$ мм различной влажности

Расход воздуха, м ³ /с	Влажность, ω , %							
	0	1	2	3	4	6	8	10
0,004	112	92	104	96	88	84	140	432
0,006	168	144	150	144	144	176	224	980
0,008	228	190	200	188	184	240	304	1392
0,01	284	238	248	240	240	296	380	1782

Особенно резкое возрастание сопротивления пористой среды наблюдается при полном насыщении ее влагой (рис. 3.9), что указывает на существенное влияние влаги на процессы фильтрации воздуха. Прямолинейность графиков свидетельствует о ламинарном режиме фильтрации.

Проведенные лабораторные исследования свидетельствуют о необходимости учета влажности горных пород при расчетах утечек рудничного воздуха. При относительно стабильных общешахтных перепадах давлений в зависимости от изменения влажности пористой среды обрушенных зон величина утечек воздуха может увеличиваться или уменьшаться в довольно широких пределах. Зависимость режима движения воздуха от влажности пористой среды обрушенных зон не наблюдается. Это связано с тем, что при большом насыщении руды водой, режим движения воздуха, как правило, ламинарный.

Поверхностные воды, попадая в зону обрушения, не только увлажняют пористую среду, но и вызывают явления, которые происходят при движении в пористой среде нескольких фаз (воды и воздуха). Появление межфазных границ требует учета капиллярных сил. Их роль в зонах обрушения может быть определяющей. Это связано с малостью размеров пор.

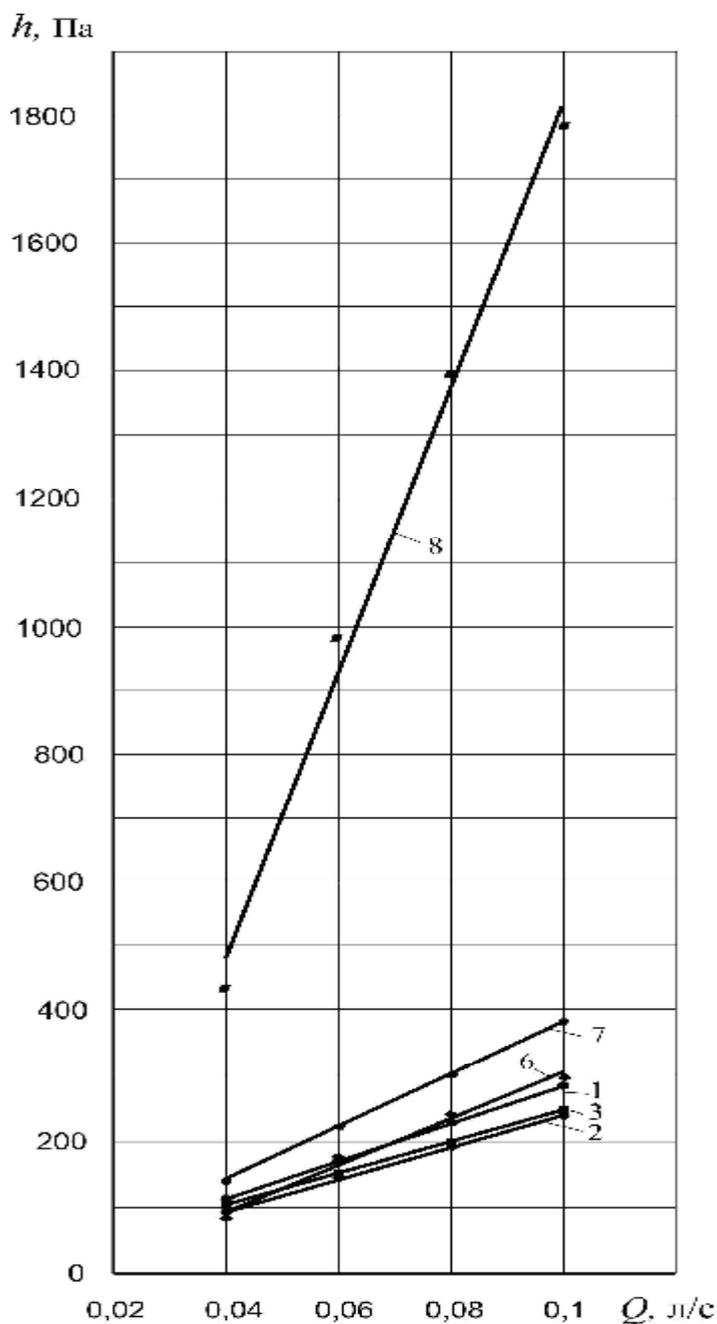


Рисунок 3.9 – Изменение аэродинамической характеристики пористой среды в зависимости от ее влажности: 1 – при $\omega=0$; 2 – при $\omega=1$; 3 – при $\omega=2$; 4 – при $\omega=3$; 5 – при $\omega=4$; 6 – при $\omega=6$; 7 – при $\omega=8$; 8 – при $\omega=10$.

Относительная роль капиллярных сил по отношению к силе тяжести и силам вязкого сопротивления определяется отношениями, которые носят название капиллярных чисел [74]:

$$Ca_g = \frac{\rho g d^2}{\sigma}, \quad Ca = \frac{\mu u}{\sigma}$$

где σ – межфазное натяжение, имеющее порядок 10 мН/м.

Подставляя характерные значения, легко убедиться в справедливости утверждения о преобладании капиллярных сил. Поэтому в каждом элементе пористой среды фазы стремятся расположиться в соответствии с капиллярными силами. При этом мелкие поры оказываются занятыми более смачивающей жидкостью, а крупные - менее смачивающей. Большинство природных пористых сред гидрофильны, и смачивающей жидкостью для них является вода, а несмачивающей - воздух. Практически пленка воды почти всегда существует на поверхности скелета грунта. Для несмачивающей фазы остаются расширения пор. Детальная картина сосуществования двух фаз в поровом пространстве будет зависеть от их количества. Его обычно характеризуют фазовыми насыщенностями s_i , $i = 1, 2$. Насыщенность - это доля порового пространства, занятая данной фазой, так что $s_1 + s_2 = 1$. В частности, если насыщенность несмачивающей фазы достаточно мала, меньше некоторого критического значения s_c , эта фаза должна распасться на отдельные капли, которые заперты капиллярными силами и неспособны двигаться под действием обычных для пористой среды перепадов давления. Именно этим объясняется неизбежность защемления некоторого количества остаточной воды в пористой среде при вытеснении ее воздухом.

При насыщенности выше критической, поровые каналы занятые данной фазой образуют связную сеть каналов и, возможно, течение. При критической насыщенности эта сеть каналов разрывается. Такой переход, происходящий при определенном соотношении между числом заполненных и незаполненных поровых каналов, является общим явлением для процессов проводимости во многих неупорядоченных физических системах.

Таким образом, в условиях преобладания поверхностного натяжения две жидкости, смачивающая и несмачивающая, например вода и воздух, занимают при данном соотношении между их насыщенностями строго определенное положение в порах. При этом течение их происходит по "своей" части порового пространства так, как если бы вторая фаза затвердела. Это напоминает течение воды и масла по одной горизонтальной трубе, только в этом случае упорядочи-

вающим фактором является сила тяжести. Поэтому для каждой из фаз справедлив закон Дарси, но проницаемость уменьшается, так как часть порового пространства занята другой фазой. Отношение эффективной проницаемости к абсолютной (однофазной) проницаемости данной среды носит название относительной фазовой проницаемости для данной фазы. В основном обе фазы движутся под одним перепадом давления.

3.6. Исследование параметров фильтрации воздуха в пористой среде при отклонении от линейного закона движения.

Движение газа в пористой среде обрушенных зон связано с возникновением сильных возмущений, обусловленных чрезвычайно сложной конфигурацией пор. Поэтому, скорости движения газа в пористой среде незначительны, по сравнению с движением в каналах. Факторами такого возмущения являются: множество резких поворотов на сравнительно малых отрезках длины поровых каналов; срыв струи с многочисленных выступов и образование местных вихрей; возникновение возмущений в потоке в результате слияния отдельных струек, которые зачастую разнонаправлены и имеют различную величину скорости. В связи с этим, при фильтрации в пористой среде, отклонение от закона Дарси происходит достаточно плавно и при малых числах Re . Плавный переход одного режима фильтрации в другой при движении газа в пористой среде обусловлен также наличием пор различного диаметра.

Плавный переход одного режима фильтрации в другой при движении флюида в пористой среде, в основном, обусловлен наличием пор различного диаметра. Турбулентность потока в различных порах возникает не одновременно. Если в некоторых из них движение идет при уже сформировавшемся турбулентном потоке, то в других он может только зародиться. При этом общего перемешивания потока, которое происходит в трубах при турбулентном движении, в пористой среде не может быть из-за наличия перегородки между отдельными порами. Таким образом, все перечисленные выше факторы снижают для

пористой среды критическое значение числа Re и приводят к плавному переходу режима фильтрации от чисто ламинарного до вполне сформировавшегося турбулентного режима и вызывают его значительно быстрее, чем это наблюдается в единичных каналах (щелях или трубах). Выделить из этого множества фактор, преобладающий для данной пористой среды, пока не представляется возможным.

В условиях сформировавшегося турбулентного режима фильтрации флюида в пористой среде, когда коэффициент гидравлического сопротивления λ_T не зависит от параметра Re_T , для определения потери давления принят параметр, учитывающий суммарно все изложенные выше факторы [52, 65]. Таким параметром для пористой среды является параметр турбулентности K_T или иначе ее проницаемость при вполне сформировавшемся турбулентном режиме фильтрации.

Все факторы, резко снижающие критическое значение параметра Re_T для пористой среды по сравнению с трубами и приводящие к плавному отклонению сопротивления при увеличении скорости фильтрации от найденного согласно линейному закону, зависят от структуры порового пространства. Следовательно, параметр турбулентности пористой среды K_T является ее функцией. В свою очередь структура порового пространства обуславливается породообразующим материалом, его укладкой, цементирующим веществом и рядом дополнительных причин, влияющих на обычные характеристики пористой среды: проницаемость, пористость, эффективный диаметр зерна, средний радиус пор и т. д. Поэтому вполне естественно связывают параметр турбулентности пористой среды с обычными характеристиками породы.

Параметр турбулентности пористой среды можно рассчитать по следующей формуле [25]

$$K_T = \frac{gd_{cp}^2}{N_T \gamma}, \quad (3.23)$$

где N_T – постоянная величина для определенного гранулометрического состава пористой среды обладающей свойственной лишь ей структурой шероховатости на внешней поверхности кусков и присущим ей эквивалентным диаметром каналов [94]; для устойчивого турбулентного режима в пористой среде можно принимать $N_T = f$ [94];

d_{cp} – средний диаметр пор, м;

γ – удельный вес воздуха, Н/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

f – коэффициент аэродинамического сопротивления пористой среды.

В связи с тем, что при определении параметров пористой среды средний диаметр пор d_{cp} задают в мм, формула (3,23) примет следующий вид:

$$K_T = \frac{10^{-6} \cdot d_{cp}^2 g}{N_T \gamma}$$

На рис. 3.10 показана зависимость параметра турбулентности пористой среды от среднего диаметра пор в породе.

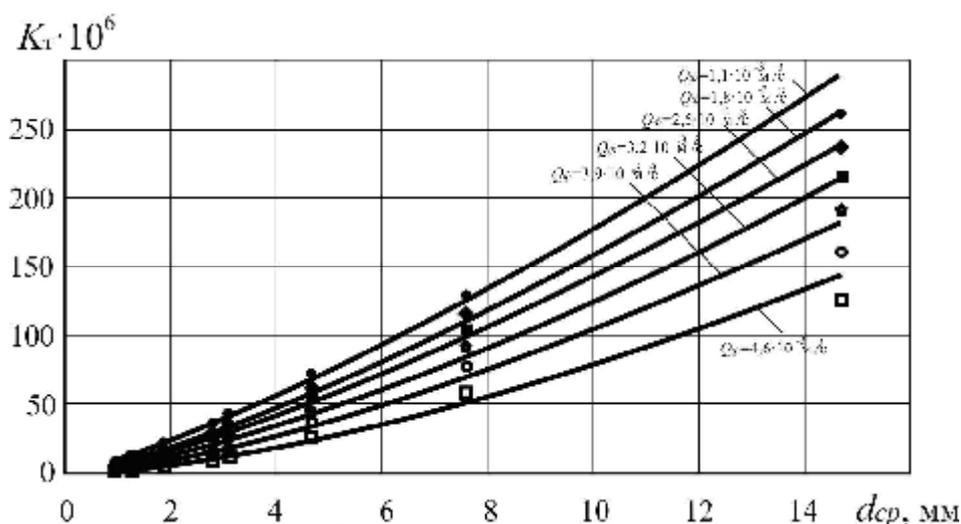


Рисунок 3.10 – Зависимость K_T от d_{cp} .

Как видно из графика, параметр K_T возрастает с увеличением среднего диаметра пор d_{cp} , который определяется по зависимости полученной на основании исследований [94]

$$d_{cp} = 1,311 \exp 0,0575 d_k, \quad (3.24)$$

где d_k – диаметр частиц породы, мм.

Количество приведенных данных на графике ограничено в связи с тем, что не по всем образцам пористых сред, на которых исследовались режимы фильтрации жидкостей и газов, проводился ситовый анализ породообразующего материала.

Эмпирическая зависимость между параметрами K_T , d_{cp} и v полученная на основании данных представленных на графике (рис. 3.10) имеет следующий вид:

$$K_T = (20,5 \cdot 10^2 \cdot Q_\phi + 0,1) d_{cp}^{0,96 - 0,18 \ln Q_\phi}$$

Зависимость проницаемости пористой среды от среднего диаметра пор в породе и режима фильтрации, полученная в результате лабораторных исследований и график которой приведен на рис. 3.11 имеет следующий вид:

$$K = 0,84 \cdot \exp(0,47 \cdot Q_\phi) \cdot \ln d_{cp} - 0,63 \cdot Q_\phi + 2,41$$

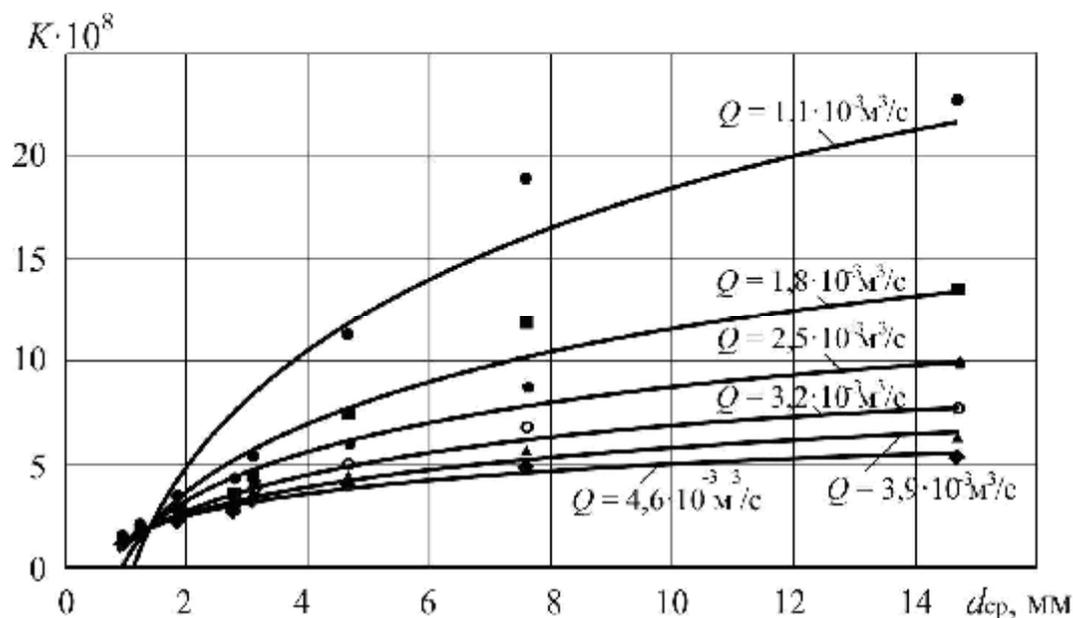


Рисунок 3.11 – Зависимость K от d_{cp} .

Из графика (рис. 3.11) видно, что проницаемость горных пород зависит от режима фильтрации и свойств пористой среды.

Изменение параметра K_T наблюдается также от коэффициента пористости (рис. 3.12).

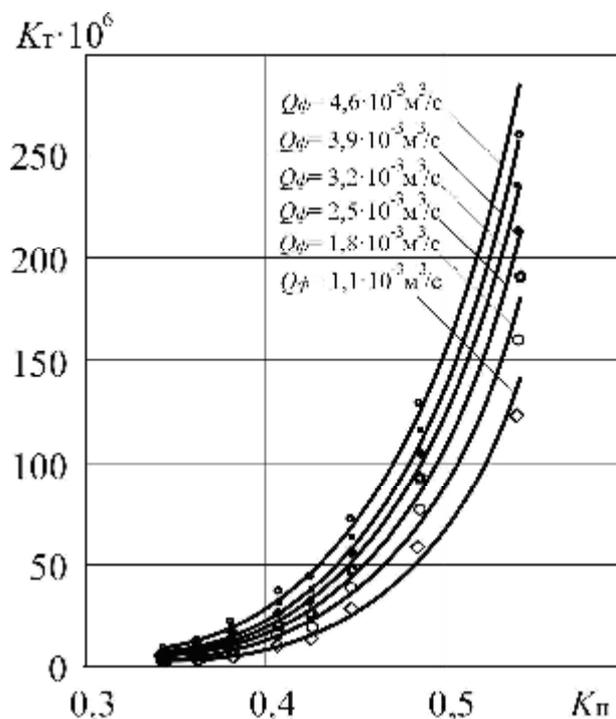


Рисунок 3.12 – Зависимость K_T от коэффициента пористости K_P .

С увеличением K_P параметр турбулентности пористой среды возрастает. Подобная тенденция к изменению параметра K_T наблюдается и от отношений проницаемости пористой среды к среднему радиусу пор или к эффективному диаметру зерна.

Как видно из графиков рис. 3.10 и 3.12, параметр турбулентности пористой среды неоднозначно зависит от тех или иных обычных параметров породы. По-видимому, эта зависимость имеет более сложный характер и не остается постоянной для различных серий пористых сред, образовавшихся при отличных геологических условиях.

Параметр турбулентности пористой среды и проницаемость породы имеют различный физический смысл. Первый обуславливает потерю давления при квадратичном законе фильтрации и имеет размерность длины. Вторым характеризует пористую среду при движении в ней жидкостей или газов по закону Дарси и имеет размерность площади. Однако, как видно из рис. 3.12, некоторая зависимость между параметром турбулентности пористой среды и коэффици-

ентом проницаемости для исследованных образцов породы существует. Это происходит потому, что параметр турбулентности пористой среды обуславливается суммой рассмотренных выше факторов, которые влияют также до некоторой степени и на проницаемость породы, а общее сочетание их, по-видимому, характерно для первого и второго параметров.

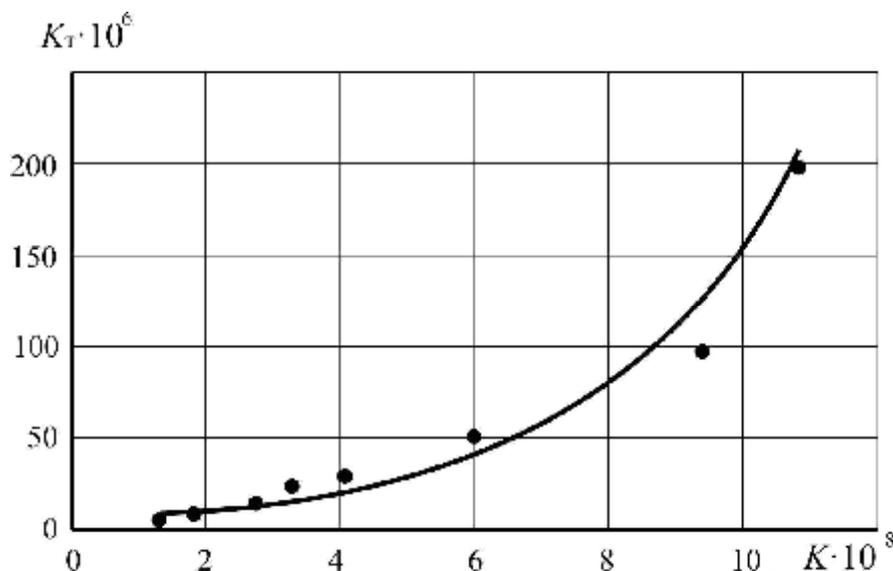


Рисунок 3.13 – Зависимость параметра турбулентности пористой среды от проницаемости.

Найденная эмпирическая зависимость между параметром турбулентности пористой среды и коэффициентом проницаемости приведенная на графике (рис. 3.13) имеет следующий вид:

$$K_T = 5,2 \cdot 10^{-6} e^{0,35K} . \quad (3.25)$$

Учитывая выражение (3.25), можно без непосредственного определения величины параметра турбулентности пористой среды, что в некоторых случаях значительно затруднено, рассчитать потерю давления по двучленному уравнению, которое справедливо в любом диапазоне чисел Re_T . Для такого расчета на основании формулы (3.13) и эмпирического выражения (3.25) двучленное уравнение можно представить в виде

$$\Delta P = \frac{2L\mu}{K} v_\phi + \frac{0,39 \cdot 10^6 L\rho}{\exp(0,35K)} v_\phi^2. \quad (3.26)$$

Таким образом, потерю давления при фильтрации газов в пористой среде более правильно определять по двучленной формуле с применением параметров породы, по которой происходит движение газа, – проницаемости и турбулентности пористой среды. При малых значениях параметра Re ошибка в расчете потери давления по уравнению Дарси в сравнении с экспериментом будет незначительной, но при возрастании этого числа значительно выше критического при заданной точности проводимых расчетов будет заметно увеличиваться разница между рассчитанным и замеренным (при экспериментальном исследовании) перепадом давления на участке пористой среды. Во втором случае, при больших значениях параметра Re расчет по квадратичной зависимости будет приближаться к действительности по мере увеличения скорости фильтрации.

В связи с вышеуказанным, уравнение фильтрации через зоны обрушения рудников (2.18) с учетом турбулентной проницаемости K_T имеет следующий вид:

$$h_{з.о.} = \frac{\mu Q_\phi}{K} \left(\frac{L_z}{S_\phi} + \frac{\ln \frac{L_g}{R_g}}{\pi l_g} \right) + \frac{0,003 \cdot \gamma_0 P_a Q_\phi^2}{g K_T T} \left(\frac{L_z}{S_\phi^2} + \frac{1}{\pi^2 l_g^2 R_g} \right). \quad (3.27)$$

где K_T – коэффициент проницаемости при сформировавшемся турбулентном режиме фильтрации в зоне обрушения (параметр турбулентности).

Первое слагаемое правой части уравнения представляет собой произведение расхода воздуха при фильтрации Q_ϕ на аэродинамическое сопротивление зоны обрушения $R_{лин}$ при условии выполнения закона Дарси, второе слагаемое учитывает квадратичный режим течения воздуха, когда закон Дарси не выполняется и представляет собой произведение квадрата расхода Q_ϕ^2 $R_{кв}$, где $R_{кв}$ – аэродинамическое сопротивление с учетом турбулентности потока.

Решая уравнение (3.27) относительно фильтрационного расхода получим:

$$Q_\phi = \frac{6 \cdot 10^{-6} \cdot K_T \mu g T \left(\frac{L_z}{S_\phi} + \frac{\ln \frac{L_e}{R_e}}{\pi l_e} \right)}{K \gamma_0 P_a u \left(\frac{L_z}{S_\phi^2} + \frac{1}{\pi^2 l_e^2 R_e} \right)} \left[1 + \frac{0,012 \cdot K^2 \gamma_0 P_a h_{3.o.} \left(\frac{L_z}{S_\phi^2} + \frac{1}{\pi^2 l_e^2 R_e} \right)}{K_T \mu^2 g \left(\frac{L_z}{S_\phi} + \frac{\ln \frac{L_e}{R_e}}{\pi l_e} \right)} \right]^{0,5} - 1. \quad (3.28)$$

С учетом зависимости (3.25), полученной в результате лабораторных исследований, выражения (3.27) и (3.28) примут следующий вид:

$$h_{3.o.} = \frac{\mu Q_\phi}{K} \left(\frac{L_z}{S_\phi} + \frac{\ln \frac{L_e}{R_e}}{\pi l_e} \right) + \frac{576,9 \cdot \gamma_0 P_a Q_\phi^2 \text{sign}(Q_\phi)}{[\exp(0,35 \cdot K)] g T} \left(\frac{L_z}{S_\phi^2} + \frac{1}{\pi^2 l_e^2 R_e} \right), \quad (3.29)$$

$$Q_\phi = \frac{6 \cdot 10^{-12} \cdot (\exp 1,402 \cdot K) \mu g T \left(\frac{L_z}{S_\phi} + \frac{\ln \frac{L_e}{R_e}}{\pi l_e} \right)}{K \gamma_0 P_a \left(\frac{L_z}{S_\phi^2} + \frac{1}{\pi^2 l_e^2 R_e} \right)} \left[1 + \frac{2,31 \cdot 10^3 \cdot K^2 \gamma_0 P_a h_{3.o.} \left(\frac{L_z}{S_\phi^2} + \frac{1}{\pi^2 l_e^2 R_e} \right)}{[\exp(0,35 \cdot K)] \mu^2 g \left(\frac{L_z}{S_\phi} + \frac{\ln \frac{L_e}{R_e}}{\pi l_e} \right)} \right]^{0,5} - 1 \quad (3.30)$$

Полученное выражение (3.29) позволяет определять величину перепада давления (депрессию) при фильтрации воздуха через зону обрушения с учетом турбулентной проницаемости.

Величина линейной составляющей общего аэродинамического сопротивления зоны обрушения $R_{\text{лин}}$ определяется по выражению (2.19), а квадратичной, с учетом турбулентной проницаемости

$$R_{\text{кв.}} = \frac{576,9 \cdot \gamma_0 P_a}{[\exp(0,35 \cdot K)] g T} \left(\frac{L_z}{S_\phi^2} + \frac{1}{\pi^2 l_e^2 R_e} \right). \quad (3.31)$$

Если величина депрессии зоны обрушения известна, то величину утечек (притечек) воздуха через нее можно определить из выражения (3.30).

3.7. Экспериментальные исследования аэродинамических параметров фильтрационного движения через обрушенные зоны.

Промышленные эксперименты на рудниках бассейна проводились для: установления режима движения воздуха через зоны обрушения рудников; определения фактических величин утечек воздуха через обрушения и сравнения результатов замеров с расчетными и лабораторными данными; установления диапазонов изменения параметров проницаемости пористой среды обрушений.

Для исследования аэродинамических параметров обрушений были выбраны шахты им. Ленина и им. Орджоникидзе, которые объединены в одну вентиляционную сеть, имеющую активную аэродинамическую связь с поверхностью через воздухопроницаемую зону обрушения, а также другие шахты Кривбасса.

Исследования проводили с участием Криворожского специального военнизированного аварийно-спасательного отряда по методике проведения воздушно-депресссионных съемок разработанной в соавторстве с сотрудниками кафедры аэрологии и охраны труда ГВУЗ «Криворожского национального университета», головного научно-исследовательского института «НИИБТГ» и Криворожского СВГСО МЧС Украины [10].

В таблице 3.5 приводятся основные результаты экспериментального определения аэродинамических параметров шахты и участка обрушения.

Как видно из табл. 3.5, величины средних депрессий через зону обрушения шахт Кривбасса, установленных воздушно-депресссионными съемками, находятся в пределах 420 - 1260 Па. Величины фильтрационных утечек через зоны обрушения Q_{ϕ} составляют 22,4...54,4 м³/с, а показатель режима движения воздуха через зоны обрушения составляет в пределах 1,1...1,46.

Таблица 3.5 – Результаты определения аэродинамических параметров обрушения на шахтах Кривбасса

Шахта	Режимы работы ГВУ		Утечки на ГВУ, $Q_{ут.гв.}$ (м ³ /с)	Выдается воздуха по стволам $Q_{выд.ств}$ (м ³ /с)	Поступает воздуха по стволам $Q_{пост.ств}$ (м ³ /с)	Утечки через зону обрушения $Q_{ф.}$ (м ³ /с)	Средняя депрессия зоны обрушения, $h_{з.о}$ Н/м ²	Показатели режима движения воздуха через зону обрушения
	Производительность $Q_{гв.}$ (м ³ /с)	Депрессия $h_{гв.}$ Н/м ²						
ш. им. Ленина и им. Орджоникидзе	142,1 240,8	250 270	31,8	351,1	296,7	54,4	1260	1,46
ш. «Родина»	181,7 135,2	202,3 82,1	44,9	272,0	231,4	40,6	900	1,28
ш. «Октябрьская»	214 129,2	122,4 105,2	48,6	294,6	246,4	48,2	850	1,15
ш. им. Фрунзе	126,6 108,5	104,3 191,2	37,1	198,0	151,5	46,5	540	1,36
ш. «Юбилейная»	166,4 107,1	302,5 123,4	27,1	246,4	212,1	34,3	420	1,25
ш. «Гвардейская»	217,3	326,2	33,5	183,8	161,4	22,4	650	1,1

Скорости фильтрации на участке с прямолинейно-параллельным потоком при $S_{ср} = 500 \text{ м}^2$ $v = 0,05 \dots 0,025 \text{ м/с}$.

Для определения параметров движения потоков в зонах обрушения была использована степенная формула, вместо двучленной (2.21) без ущерба для точности

$$h_o = R_{ком} Q^n, \quad (3.32)$$

где $R_{ком}$ – общее сопротивление, вентиляционной сети при комбинированном режиме;

n – показатель степени, определяющий режим движения воздуха.

В табл. 3.5 приведены результаты вычисления показателя режима движения по формуле (3.32) для двух смежных вентиляционных режимов, позволяющие сделать заключение о том, что режим движения в обрушении колебался от

ламинарного ($n = 1$) при невысоких $h_{з.о.}$ до комбинированного с $n = 1,46$ при значительных $h_{з.о.} = 900 \dots 1260$ Па.

Таким образом, результаты воздушно-депресссионных съемок свидетельствуют о том, что в обрушениях движение воздуха происходит по комбинированному режиму.

Для вентиляционных режимов по формуле (3.29) были вычислены значения коэффициентов проницаемости K , значения которых находились в пределах $K = (21,4 \dots 26,8) \cdot 10^8$ м². Для этих же режимов определены величины средних значения линейных $R_{лин}$, и квадратичных составляющих $R_{кв}$ в двучленной формуле закона сопротивления при фильтрации

$$h_{з.о.} = 37,5 \cdot Q_{\phi} + 0,64 \cdot Q_{\phi}^2 \quad (3.33)$$

где 37,5 – значение линейной составляющей аэродинамического сопротивления параметра $R_{лин}$ в законе фильтрации, Н·с/м⁵;

0,64 – значение квадратичной составляющей аэродинамического сопротивления $R_{кв}$ (Н·с²/м⁸) с учетом турбулентной проницаемости K_T .

Относительная ошибка в определении $h_{з.о.}$ по формуле (3.33) для режимов фильтрации, близким к реальным, не превышает $\delta h_{з.о.} = \pm 2,3$.

3.8. Выводы.

Выводы по результатам исследований изложенных в данном разделе сводятся к следующему:

- установлен характер изменения режимов фильтрации газов в зависимости от гранулометрического состава пористой среды; проведенные исследования по определению влияния гранулометрического состава пористой среды на режим движения воздуха в ней показали, что с уменьшением крупности горных пород снижается ее пористость и уменьшается показатель режима движения воздуха;

- определены значения критериев режима фильтрации газов через пористую среду зон обрушения;

- обосновано, что использование показателя режима движения газа n в качестве критерия режима фильтрации позволяет более достоверно определять основные фильтрационные характеристики в зонах обрушения;

- графики изменения показателя режима движения воздуха через смеси из различного фракционного состава пород в зависимости от процентного содержания определяющего класса, полученные в результате эксперимента, хорошо согласуются с физическими представлениями о фильтрационных процессах в аэродинамически активных зонах обрушения при прохождении через них атмосферного воздуха;

- качественные и количественные характеристики процесса фильтрации газа через пористые среды обрушенных зон с различными свойствами, полученные в результате экспериментальных исследований, свидетельствуют о том, что при движении газа по порам обрушенного пространства, возникают сильные возмущения, которые обуславливаются чрезвычайно сложной конфигурацией пор и что, в свою очередь, приводит к достаточно плавному отклонению от закона Дарси при сравнительно малых числах Re ;

- установлено, что все факторы, резко снижающие критическое значение параметра Re для пористой среды по сравнению с каналами и приводящие к плавному отклонению сопротивления при увеличении скорости фильтрации от найденного согласно линейному закону, зависят от структуры порового пространства, следовательно, параметр турбулентности пористой среды K_T является ее функцией;

- установлено, что основным фактором, оказывающим влияние на изменение сопротивления пористой среды зоны обрушения, является процесс коагуляции происходящий при фильтрации жидкости (в результате атмосферных осадков) с содержанием мелких взвешенных в ней частиц через поверхностный слой обрушенной зоны, которые проникают в поровое пространство более крупной горной породы.

4. РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕНТИЛЯЦИИ РУДНИКОВ С АЭРОАКТИВНЫМИ ЗОНАМИ ОБРУШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ КРИВБАССА

4.1. Способ управления фильтрационными режимами в зоне обрушений путем смещения зоны нулевой депрессии в сети горных выработок.

Применение в настоящее время высокопроизводительной технологии добычи полезных ископаемых из мощных месторождений подземным способом с использованием систем разработки с обрушением руды и покрывающих пород, а также создание принципиально новых технологических комплексных открыто-подземных схем ведения горных работ [14, 99] приводит к образованию аэроактивных зон обрушения, оказывающих существенное влияние на проветривание горных выработок. Фильтрация воздуха через зоны обрушения приводит к значительным непроизводительным потерям его, в результате чего уменьшается количество свежего воздуха доходящего до забоев и нарушается планируемый воздухообмен в подземных горных участках, блоках, камерах и отдельных забоях [1, 3, 100].

Значительное влияние на фильтрацию воздуха через зону обрушения оказывает способ проветривания шахты. Например, при проветривании одной и той же шахты количество воздуха в результате его фильтрации через зону обрушения составляет: при всасывающем способе 63,5%, при нагнетательном – 51%, при комбинированном – 9% [1]. Таким образом, наиболее эффективный способ проветривания шахт с аэродинамически активными обрушениями – комбинированный, что объясняется наличием зоны с нулевой депрессией. Если эта зона находится под обрушением, то наблюдается снижение интенсивности процесса фильтрации, в связи с уменьшением разности давлений между выработками шахты и дневной поверхностью.

Появление зоны с нулевой депрессией (точка Е, рис. 4.1) возможно

только при работе двух вентиляторных установок, одна из которых должна работать на нагнетание (в точке А), а другая (в точке В) – на всасывание [94]. То есть имеем последовательное включение двух вентиляторов, расположенных на разных концах вентиляционной сети, содержащей аэродинамически активную зону.

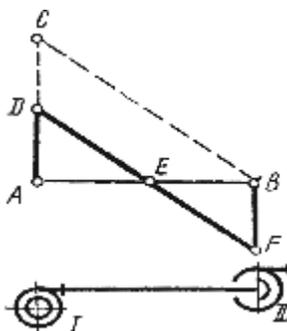


Рисунок 4.1 - Эпюра статического давления при включении вентиляторов в последовательную работу

При последовательном включении, одно и то же количество воздуха последовательно перемещается двумя вентиляторами, а давление, необходимое для преодоления сопротивления всей сети, равно сумме давлений, создаваемых каждым вентилятором. Так как кинетическая энергия, сообщенная потоку первым вентилятором, не теряется на удар, то общее статическое давление больше суммы статических давлений отдельных вентиляторов.

В схеме, показанной на рис. 4.1, вентилятор I преодолевает сопротивление на участке АЕ, создавая избыточное статическое давление АД. Вентилятор II, расположенный в конце сети, преодолевает потери на участке ЕВ, создавая разрежение ВF.

Таким образом для снижения интенсивности процесса фильтрации воздуха через зону обрушения, необходимо смещение зоны нулевой депрессии в место ведения очистных, что возможно осуществить только путём регулирования режимов работы вентиляторов главного проветривания. При этом разность статических давлений на поверхности зоны обрушения и у её подошвы будет близка к нулю, а утечки воздуха будут минимальны (рис. 4.2).

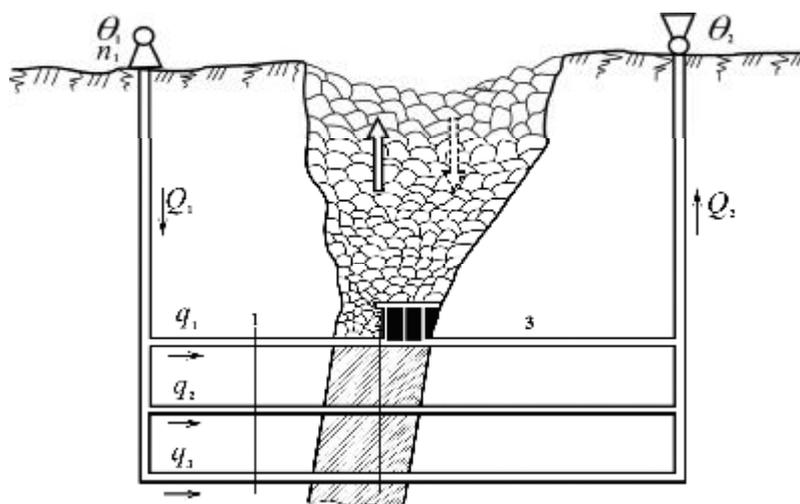


Рисунок 4.2 - Схема вентиляционной системы шахты с аэродинамически активной зоной обрушения.

Решение этой задачи расчётными методами требует информации о параметрах вентиляционной системы высокой достоверности, которые к тому же меняются в пространстве и времени. Кроме этого, некоторые аэродинамические процессы (фильтрация воздуха и его примесей через зону обрушения, явление подсоса вентиляторов при их совместной работе на общую сеть и др.) недостаточно изучены.

Поэтому для решения этой задачи могут быть рекомендованы методы математической статистики, в частности, методы планирования промышленных экспериментов при поиске оптимальных условий [101 – 103]. При этом вентиляционная система представляется как кибернетическая система с входными и выходными параметрами (рис. 4.3). Такой подход позволяет даже при неполном знании внутренних процессов вентиляционной системы определить режимы работы вентиляторов главного проветривания, при которых утечки воздуха через зону обрушения будут минимальны.

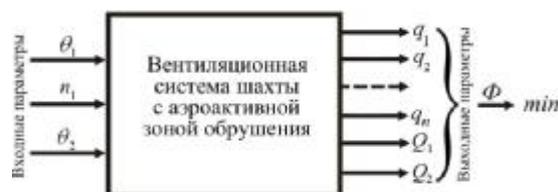


Рисунок 4.3 - Кибернетическая схема вентиляционной системы шахты с зоной обрушения

В качестве входных параметров системы приняты значения параметров, характеризующие положения устройств, регулирующих производительность и депрессию (напор) установленных вентиляторов главного проветривания. Примем, для примера, что первый центробежный вентилятор, работающий на нагнетание, оборудован осевым направляющим аппаратом и системой управления приводным электродвигателем, позволяющей изменять частоту вращения рабочего колеса. Второй центробежный вентилятор, допустим, оборудован только осевым направляющим аппаратом. В этом случае входными параметрами кибернетической системы будут (рис. 4.3):

- угол установки лопаток осевого направляющего аппарата первого вентилятора θ_1 , град;
- частота вращения рабочего колеса первого вентилятора n_1 , об/с;
- угол установки лопаток осевого направляющего аппарата второго вентилятора θ_2 , град,

В качестве выходных параметров вентиляционной системы с аэродинамически активной зоной обрушения принимаем параметры, которые характеризуют обеспеченность воздухом подземных потребителей и утечки (притечки) воздуха через зону обрушения. Обеспеченность воздухом потребителей характеризует коэффициент обеспеченности в виде

$$\frac{q - q_p}{q},$$

где q – расход воздуха подземного потребителя, м³/с;

q_p – расчётный расход воздуха этого потребителя, м³/с.

Утечки (притечки) через зону обрушения, как отмечалось выше, зависят от положения зоны нулевой депрессии в сети горных выработок. Если она находится в выработках висячего бока (точка 1, рис. 4.2), то в этом случае интенсивность работы первого вентилятора, работающего на нагнетание, занижена и будут наблюдаться притечки воздуха через зону обрушения под

воздействием депрессии второго вентилятора, работающего на всасывание. При этом подача второго вентилятора (Q_2) ,будет выше, чем подача первого вентилятора (Q_1), на величину притечек. При значительном снижении интенсивности работы второго вентилятора зона нулевой депрессии смещается в выработки лежачего бока (точка3, рис. 4.2) и наблюдается обратная картина. В этом случае статическое давление в зоне ведения очистных работ будет выше атмосферного и будут иметь место утечки воздуха через зону обрушения. Подача первого вентилятора(Q_1) при этом будет выше, чем подача второго вентилятора (Q_2), на величину утечек. Если подобрать режимы работы вентиляторов таким образом, чтобы зона нулевой депрессии находилась в месте ведения очистных работ у подошвы зоны обрушения (точка 2, рис. 4.2), то в этом случае утечки и притечки воздуха через зону обрушения будут отсутствовать, а подачи обоих вентиляторов сравняются ($Q_1=Q_2$).

Таким образом, решение поставленной задачи сводится к определению режимов работы вентиляторов главного проветривания, при которых обеспеченность свежим воздухом подземных потребителей будет наиболее близка к расчётной, а подачи вентиляторов будут равны между собой. Это задача поиска оптимальных условий протекания производственных процессов, математический аппарат которого в настоящее время получил достаточное развитие [101 – 103].

Прежде всего необходимо разработать критерий оптимизации (функцию цели) решаемой задачи (Φ), который принимаем в виде:

$$\Phi = \left| \frac{q_1 - q_{1p}}{q_{1p}} \right| + \left| \frac{q_2 - q_{2p}}{q_{2p}} \right| + \dots + \left| \frac{q_n - q_{np}}{q_{np}} \right| + \left| \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \right| \quad (4.1)$$

Задача решается в следующем диапазоне изменения входных регулируемых параметров, то есть при ограничениях:

$$\begin{aligned}
 \theta_{1\min} &\leq \theta_1 \leq \theta_{1\max}; \\
 n_{1\min} &\leq n_1 \leq n_{1\max}; \\
 \theta_{2\min} &\leq \theta_2 \leq \theta_{2\max}.
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Определение оптимальных режимов вентиляторов главного проветривания, при которых критерий оптимизации Φ будет наилучшим (минимальным), можно осуществить с помощью методов математической статистики [101 – 103]. Эти методы позволяют при неполном знании внутренних связей исследуемого процесса, путём проведения экспериментов, определить аналитическую зависимость показателя Φ от входных регулируемых параметров θ_1, n_1, θ_2 . Исследования полученной зависимости на экстремум (минимум) позволяют определить значения входных параметров системы, при которых достигается наилучшее значение Φ , т.е. при которых утечки воздуха через зону обрушения будут минимальны при расчётном распределении воздуха по подземным потребителям.

Перед проведением факторного эксперимента необходимо установить диапазон варьирования входных параметров θ_1, n_1, θ_2 . Определяют максимальное значение каждого параметра в натуральных единицах измерения, что в кодированных значениях параметра соответствует +1. Аналогично минимальное значение каждого параметра соответствует -1, а среднее значение называют нулевым уровнем, что в кодированном выражении соответствует 0. С учётом этого выбираем следующие диапазоны варьирования входных регулируемых параметров модели:

угол установки лопаток направляющего аппарата первого вентилятора θ_1 :

- верхний уровень – $\theta_{1\max} (+1)$;

- нижний уровень – $\theta_{1\min} (-1)$;

- нулевой уровень – $\theta_{10} = \frac{\theta_{1\max} + \theta_{1\min}}{2} (0)$;

- шаг варьирования – $(\theta_{1\max} - \theta_{10}) = \Delta\theta_1$;

- частота вращения рабочего колеса первого вентилятора n_1 :

- верхний уровень – $n_{1\max} (+1)$;
- нижний уровень – $n_{1\min} (-1)$;
- нулевой уровень – $n_{10} = \frac{n_{1\max} + n_{1\min}}{2} (0)$;
- шаг варьирования – $(n_{1\max} - n_{10}) = \Delta n_1$;

угол установки лопаток направляющего аппарата второго вентилятора θ_2 :

- верхний уровень – $\theta_{2\max} (+1)$;
- нижний уровень – $\theta_{2\min} (-1)$;
- нулевой уровень – $\theta_{20} = \frac{\theta_{2\max} + \theta_{2\min}}{2} (0)$;
- шаг варьирования – $(\theta_{2\max} - \theta_{20}) = \Delta \theta_2$;

Полный факторный эксперимент (ПФЭ) предусматривает проведение 2^k опытов, где k – количество варьируемых входных параметров (факторов) [101 – 103]. Для трёх факторов ($k=3$) опыты проводят при комбинациях, соответствующих координатам вершин куба, который имеет центр в точке с нулевым уровнем факторов $(\theta_{10}, n_{10}, \theta_{20})$, а ребро имеет длину в два шага варьирования. Задают план ПФЭ с помощью матрицы эксперимента. Если поменять начало отсчёта, т.е. перенести его в точку нулевого уровня, и изменить масштаб осей с натуральных значений $(\theta_1, n_1, \theta_2)$ в шаги варьирования $(\Delta \theta_1, \Delta n_1, \Delta \theta_2)$, то план ПФЭ можно записать в виде соответствующей матрицы.

В новой системе координат $(\bar{\theta}_1, \bar{n}_1, \bar{\theta}_2)$ точки проведения опытов выражены в кодированных величинах (в шагах варьирования), которые принимают значения +1 или -1 (табл. 4.1).

Для перехода с кодированных значений факторов в натуральные и наоборот используют зависимости перехода:

$$\begin{aligned}
 \bar{\theta}_1 \cdot \Delta \theta_1 &= \theta_1 - \theta_{10} \\
 \bar{n}_1 \cdot \Delta n_1 &= n_1 - n_{10}; \\
 \bar{\theta}_2 \cdot \Delta \theta_2 &= \theta_2 - \theta_{20},
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

где $\bar{\theta}_1, \bar{n}_1, \bar{\theta}_2$ – кодированные значения факторов;

$\Delta\theta_1, \Delta n_1, \Delta\theta_2$ – шаги варьирования факторов;

$\theta_{10}, n_{10}, \theta_{20}$ – нулевые значения факторов.

Таблица 4.1 - План проведения полного факторного эксперимента ($\kappa = 3$)

Номер опыта	$\bar{\theta}_1$	\bar{n}_1	$\bar{\theta}_2$
1	+1	+1	+1
2	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1
4	-1	-1	+1
5	+1	+1	-1
6	-1	+1	-1
7	+1	-1	-1
8	-1	-1	-1

Для получения аналитической зависимости критерия оптимизации от входных параметров, то есть математической модели управления распределением воздуха по подземным потребителям и утечками через зону обрушения, в каждом опыте необходимо производить измерение расходов воздуха по каждому подземному потребителю (q_1, q_2, \dots, q_n) и подач вентиляторов (Q_1, Q_2).

По результатам измерений выходных параметров по выражению (4.1) рассчитывают значение критерия оптимизации Φ в каждом опыте. Результаты измерений и вычислений сводят в табл. 4.2.

Таблица 4.2 - Результаты измерений выходных параметров при проведении эксперимента

№ опыта	Входные параметры			Выходные параметры					
	$\bar{\theta}_1$	\bar{n}_1	$\bar{\theta}_2$	q_1	q_2	q_n	Q_1	Q_2	Φ
1	+1	+1	+1	q_{11}	q_{21}	q_{n1}	Q_{11}	Q_{21}	Φ_1
2	-1	+1	+1	q_{12}	q_{22}	q_{n2}	Q_{12}	Q_{22}	Φ_2
3	+1	-1	+1	q_{13}	q_{23}	q_{n3}	Q_{13}	Q_{23}	Φ_3
4	-1	-1	+1	q_{14}	q_{24}	q_{n4}	Q_{14}	Q_{24}	Φ_4
5	+1	+1	-1	q_{15}	q_{25}	q_{n5}	Q_{15}	Q_{25}	Φ_5
6	-1	+1	-1	q_{16}	q_{26}	q_{n6}	Q_{16}	Q_{26}	Φ_6
7	+1	-1	-1	q_{17}	q_{27}	q_{n7}	Q_{17}	Q_{27}	Φ_7
8	-1	-1	-1	q_{18}	q_{28}	q_{n8}	Q_{18}	Q_{28}	Φ_8

Для нивелирования случайных помех при длительных сроках проведения эксперимента каждый опыт проводят трижды, причём последовательность их проведения определяют по ряду случайных величин. Математическое ожидание каждого выходного параметра находят как среднеарифметическое по результатам параллельных опытов.

Для оценки качества разрабатываемой математической модели управления утечками через зону обрушения, её адекватности реальному процессу, весьма важно оценить ошибки определения выходных параметров в разных областях факторного пространства или, другими словами, проверить однородны ли дисперсии выходных параметров. Проверку однородности дисперсий осуществляют с помощью критерия Кохнера [102], который применяется, если во всех точках число параллельных опытов – одинаковое (критерий Кохнера характеризует управляемость объекта и полноту учёта входных параметров) [102]. Вычисления критерия производят следующим образом:

Для каждого опыта находят дисперсию по выражению:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (q_{ij} - q_i)^2}{m-1}, \quad (4.4)$$

где S_i^2 – дисперсия опыта; $i=1,2,\dots$;

n – номер опыта в эксперименте;

m – число параллельных опытов;

q_{ij} – расход воздуха соответствующего потребителя (или другой выходной параметр) i -го опыта в эксперименте в j -ом параллельном опыте, м;

q_i – математическое ожидание расхода воздуха (или другого выходного параметра) i -го опыта в эксперименте, м.

Далее среди всех S_i^2 находят наибольшую, которую делим на сумму всех дисперсий

$$G = S_{i_{\max}}^2 / \sum_{u=1}^N S_u^2. \quad (4.5)$$

Если значение полученного критерия меньше табличного для степеней свободы $\gamma_1 = m - 1$, $\gamma_2 = n$, то гипотезу об однородности дисперсий можно принять.

Проведенный таким образом промышленный эксперимент позволяет получить математическую модель управления утечками через зону обрушения, которые выражают зависимость критерия оптимизации Φ от значений входных параметров $\Phi = f(\theta_1, n_1, \theta_2)$, или в развернутом виде в кодированных значениях факторов

$$\Phi = b_0 + b_1\bar{\theta}_1 + b_2\bar{n}_1 + b_3\bar{\theta}_2 + b_{12}\bar{\theta}_1\bar{n}_1 + b_{13}\bar{\theta}_1\bar{\theta}_2 + b_{23}\bar{n}_1\bar{\theta}_2 + b_{123}\bar{\theta}_1\bar{n}_1\bar{\theta}_2 \quad (4.6)$$

где b_0 – свободные члены уравнения;

b_1, b_2, b_3 – коэффициенты при линейных членах;

$b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ – коэффициенты при нелинейных членах.

Планируя эксперимент, на первом этапе стремятся получить линейную модель. Однако, чаще всего встречаются случаи, когда эффект влияния одного входного параметра зависит от значений других входных параметров. Для количественной оценки эффектов взаимодействия необходимо, пользуясь правилом перемножения столбцов исходной матрицы, получить столбцы произведений столбцов матрицы. Для определения коэффициентов уравнений применяют метод наименьших квадратов, который благодаря симметричности матрицы планирования экспериментов и условия нормировки (сумма квадратов элементов каждого столбца равна числу опытов) сводится к присвоению соответствующему столбцу значений критерия оптимизации и алгебраическому сложению полученных значений [102]. Деление результатов сложения на число опытов в матрице планирования даёт искомый коэффициент. Свободные члены уравнений вычисляются как среднеарифметическое значение выходного параметра во всех опытах эксперимента. Последовательность получения коэффициентов уравнения (6) представлено в таблице 4.3.

Таким образом, после определения значений коэффициентов получаем уравнение (4.6) в кодированных значениях переменных, т.е. в шагах их варьирования.

Таблица 4.3 - Определение коэффициентов зависимости (4.6)

№ опыта	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₂	b ₁₃	b ₂₃	b ₁₂₃
1	+Φ ₁							
2	+Φ ₂	-Φ ₂	+Φ ₂	+Φ ₂	-Φ ₂	-Φ ₂	+Φ ₂	-Φ ₂
3	+Φ ₃	+Φ ₃	-Φ ₃	+Φ ₃	-Φ ₃	+Φ ₃	-Φ ₃	-Φ ₃
4	+Φ ₄	-Φ ₄	-Φ ₄	+Φ ₄	+Φ ₄	-Φ ₄	-Φ ₄	+Φ ₄
5	+Φ ₅	+Φ ₅	+Φ ₅	-Φ ₅	+Φ ₅	-Φ ₅	-Φ ₅	-Φ ₅
6	+Φ ₆	-Φ ₆	+Φ ₆	-Φ ₆	-Φ ₆	+Φ ₆	-Φ ₆	+Φ ₆
7	+Φ ₇	+Φ ₇	-Φ ₇	-Φ ₇	-Φ ₇	-Φ ₇	+Φ ₇	+Φ ₇
8	+Φ ₈	-Φ ₈	-Φ ₈	-Φ ₈	+Φ ₈	+Φ ₈	+Φ ₈	-Φ ₈
Σ	ΣΦ							
Σ/8	ΣΦ/8							

После определения коэффициентов уравнений системы проводят проверку их значимости. Проверка значимости каждого коэффициента проводится независимо и может быть определена по его доверительному интервалу:

$$\Delta b_i = \pm t_{кр} \sqrt{\frac{S^2}{Nm}}, \quad (4.7)$$

где $t_{кр}$ – табличное значение критерия Стьюдента при выбранном уровне значимости и числе степеней свободы, с которым определялась дисперсия воспроизводимости;

S^2 – дисперсия воспроизводимости опытов при определении выходных параметров.

Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала $|b_i| > \Delta b_i$.

Полученная таким образом математическая модель управления утечками через зону обрушения позволяет определить режимы вентиляторов главного проветривания, при которых внешние утечки будут минимальными.

Перед использованием математической модели проверяют её адекватность по критерию Фишера [102], значение которого вычисляют по выражению

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_0^2}, \quad (4.8)$$

где S_0^2 – дисперсия опыта.

Дисперсия адекватности определяется из выражения:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\Phi_{iэ} - \Phi_i)^2}{N - d},$$

где $\Phi_{iэ}$ – значение критерия оптимизации в i - том опыте, измеренная в ходе эксперимента, м;

Φ_i – значение того же выходного параметра, вычисленного по уравнениям математической модели;

N – число опытов в эксперименте;

d – число членов уравнения математической модели.

Математическая модель адекватно описывает реальный процесс, если полученное значение критерия меньше табличного.

Для определения значений входных регулируемых параметров системы, при которых показатель Φ минимален, то есть относительная разница выходных параметров системы и их нормируемых значений наименьшая, необходимо вначале получить аналитическую зависимость $\Phi = (\theta_1, n_1, \theta_2)$ в натуральных значениях входных параметров.

Воспользовавшись выражением (4.3), зависимость (4.6) можно получить в натуральных значениях переменных в следующем виде:

$$\Phi = b_0 + b_1\theta_1 + b_2n_1 + b_3\theta_2 + b_{12}\theta_1n_1 + b_{13}\theta_1\theta_2 + b_{23}n_1\theta_2 + b_{123}\theta_1n_1\theta_2 \quad (4.9)$$

Оптимальные значения входных параметров можно определить, исследовав выражение (9) на экстремум (минимум), при котором достигается равенство нулю частных производных функции Φ . Процедура сводится к

решению следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Phi}{\partial \theta_1} &= b_1 + b_{12}n_1 + b_{13}\theta_2 + b_{123}n_1\theta_2, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial n_1} &= b_2 + b_{12}\theta_1 + b_{23}\theta_2 + b_{123}\theta_1\theta_2, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \theta_2} &= b_3 + b_{13}\theta_1 + b_{23}n_1 + b_{123}\theta_1n_1.\end{aligned}\tag{4.10}$$

Таким образом, разработанный метод может быть предложен для определения режимов работы вентиляторов главного проветривания, при которых утечки (притечки) воздуха через зоны обрушения сведены к минимуму при расчётном распределении воздуха по подземным потребителям.

При проветривании шахт с аэроактивными зонами обрушений всасывающим или нагнетательным способом с использованием одного вентилятора главного проветривания, для создания зоны нулевой депрессии необходимо сооружение компенсационной камеры и установка подземного вентилятора для выравнивания давлений [104, 105]. Определение режимов работы вентилятора главного проветривания и подземного вентилятора, при которых утечки (притечки) воздуха через зоны обрушения минимальны производится аналогично по вышеприведенной методике.

4.2. Определение основных аэродинамических параметров вентиляционных систем рудников с аэроактивными зонами обрушения.

Квадратичный закон сопротивления движения воздуха широко используется в рудничной аэродинамике для описания движения в выработках, трубах, при обтекании лобовых и местных сопротивлений при больших числах Re . Однако, на рудниках с аэродинамически активными обрушениями вентиляционные сети состоят из ветвей с линейными, промежуточными и квадратичными законами движения воздуха.

Согласно современным представлениям [60], сопротивление при фильтрации определяется действием сил вязкости и сил инерции, что более правильно выражается двучленным законом сопротивления

$$h_{з.о.} = R_l Q + R_T Q^2, \quad (4.11)$$

где R_l и R_T – соответственно линейное и турбулентное сопротивления

Как показано в работе Ю.А. Шашмурина [62], по степени точности уравнения в двучленной форме (4.11) и в виде степенной формулы (4.12) примерно равноценны. Поэтому расчет вентиляционных сетей при различных законах движения в ветвях, можно вести по этим двум формулам, которые в равной степени применимы как для зон обрушения, так и для основных воздухопроводящих ветвей сети рудников.

$$h_{з.о.} = R_{ком} Q^n, \quad (4.12)$$

где $R_{ком}$ общее сопротивление вентиляционной сети при комбинированном режиме, $\text{Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^{2+3n}$ n - показатель степени, определяющий этот комбинированный режим; $1 \leq n \leq 2$.

Расчет вентиляционных сетей при различных соединениях выработок и использовании двучленного закона сопротивления рассмотрен в работах Ф.А. Абрамова [90], В.А. Ярцева [64 – 66, 106, 107], Р.Б. Тяна [108], Т.В. Бунько [109, 110] поэтому в настоящей работе рассмотрены вопросы определения общих показателей степени в формуле (4.11) степенного закона сопротивления при движении воздушных потоков для последовательного, параллельного и смешанного соединения ветвей.

Депрессия выработок при последовательном их соединении (рис. 4.4) равна сумме депрессий всех входящих в это соединение выработок

$$h_{3.o.} = h_1 + h_2 + \dots + h_k = R_1 Q^{n_1} + R_2 Q^{n_2} + \dots + R_k Q^{n_k} = \sum_{i=1}^k R_i Q^{n_i}, \quad (4.13)$$

где K - число последовательно соединенных ветвей в последовательном соединении.

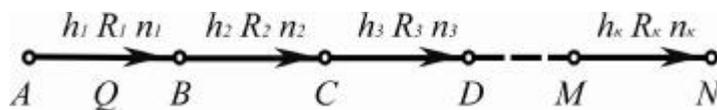


Рисунок 4.4 - Расчетная схема последовательного соединения выработок вентиляционной сети при различных режимах движения воздуха в ветвях.

В результате решения уравнения (4.12) относительно n , получаем логарифмическое выражение

$$n = \frac{\lg h_{3.o.} - \lg R_{ком}}{\lg Q} \quad (4.14)$$

После дифференцирования логарифмической функции (4.14), получим

$$n = \frac{Q dh_{3.o.}}{h_{3.o.} dQ} \quad (4.15)$$

Производная dh_0/dQ выражения (4.13) имеет следующий вид

$$\frac{dh_{3.o.}}{dQ} = n_1 R_1 Q^{n_1-1} + n_2 R_2 Q^{n_2-1} + \dots + n_k R_k Q^{n_k-1} = \sum_{i=1}^k n_i R_i Q^{n_i-1} \quad (4.16)$$

При подстановке dh_0/dQ (4.16) в (4.15) получаем выражение для определения общего показателя комбинированного режима движения воздуха в сети при последовательном соединении ветвей

$$n = Q \frac{n_1 R_1 Q^{n_1-1} + n_2 R_2 Q^{n_2-1} + \dots + n_k R_k Q^{n_k-1}}{h_{3.o.}} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i h_i}{h_{3.o.}}, \quad (4.17)$$

откуда общая депрессия последовательного соединения

$$h_{з.о.} = \frac{\sum_{i=1}^{\kappa} n_i h_i}{n} \quad (4.18)$$

При использовании двучленного закона сопротивления общее сопротивление последовательного соединения равно [76]

$$h_{з.о.} = \sum_{i=1}^{\kappa} R_{ли} Q + \sum_{i=1}^{\kappa} R_{ки} Q^2 = \sum_{i=1}^{\kappa} h_{ли} + \sum_{i=1}^{\kappa} h_{ки}, \quad (4.19)$$

где $R_{ли}$ и $R_{ки}$ – линейная и квадратичная составляющие аэродинамического сопротивления i -й ветви.

При параллельном соединении ветвей (рис. 4.5), с учетом его свойств можно записать

$$Q_{з.о.} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_{\kappa} = \sum_{i=1}^{\kappa} Q_i, \quad (4.20)$$

$$h = h_1 = h_2 = \dots = h_{\kappa} = R_i Q_i^{n_i}, \quad (4.21)$$

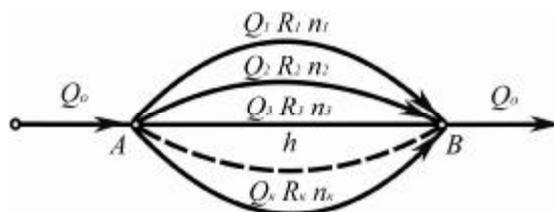


Рисунок 4.5 - Расчетная схема последовательного соединения выработок вентиляционной сети при различных режимах движения воздуха в ветвях.

При дифференцировании уравнений (4.20) и (4.21), получим

$$dQ = dQ_1 + dQ_2 + \dots + dQ_{\kappa} = \sum_{i=1}^{\kappa} dQ_i, \quad (4.22)$$

$$dh_1 = n_1 R_1 Q_1^{n_1-1} dQ_1; \quad dh_2 = n_2 R_2 Q_2^{n_2-1} dQ_2; \quad dh_k = n_k R_k Q_k^{n_k-1} dQ_k \quad (4.23)$$

Подставив значения dQ_1, dQ_2, \dots, dQ_k из (4.23) в (4.22), получаем

$$dQ = \frac{dh}{n_1 R_1 Q_1^{n_1-1}} + \frac{dh}{n_2 R_2 Q_2^{n_2-1}} + \dots + \frac{dh}{n_k R_k Q_k^{n_k-1}} \quad (4.24)$$

откуда

$$\frac{dh}{dQ} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i R_i Q_i^{n_i-1}}} \quad (4.25)$$

В результате подстановки (4.25) в (4.15) и с учетом выражения (4.13) получаем выражение для определения общего показателя комбинированного режима движения в сети при параллельном соединении ветвей с различными режимами движения воздушных потоков в них

$$n = \frac{Q_{з.о.} dh}{hdQ_{з.о.}} = \frac{Q_{з.о.}}{\sum_{i=1}^k \frac{Q_i}{n_i}}, \quad (4.26)$$

откуда

$$Q_{з.о.} = n \sum_{i=1}^k \frac{Q_i}{n_i} \quad (4.27)$$

Общее аэродинамическое сопротивление сети при комбинированном режиме движения $R_{ком}$ при найденных значениях общего показателя режима движения n находится из формулы (4.12).

Рассмотрим случай сложного последовательно-параллельного соединения вентиляционного участка шахты с аэродинамически активным обрушением и при наличии утечек воздуха на ГВУ при всасывающем способе проветривания. На рис. 4.5 *а* и *б* приводится принципиальная схема вентиляции и схема вентиляционных соединений такого участка сети рудника.

общего показателя режима движения воздушных потоков в шахтной сети

$$n_{ш.с.} = \frac{Q'_{ш} n_1 (n_{з.о.} h_{з.о.} + n_{ВГ} h_{ВГ})}{Q_{ш} (n_{з.о.} h_{з.о.} + n_{ВГ} h_{ВГ}) + Q_{з.о.} n_1 (h_{з.о.} + h_{ВГ})}, \quad (4.30)$$

где $h_2 = h_{з.о.}$ – средняя депрессия зоны обрушения; $h_3 = h_{г.з.}$ – депрессия участка вентиляционного горизонта; $n_2 = n_{з.о.}$ – показатель режима движения при фильтрации через обрушения; $n_{г.з.}$ – показатель режима движения воздушного потока на участке вентиляционного горизонта.

Так как ветви утечек воздуха с поверхности через надшахтное здание (ветвь 12-10) (рис. 4.7) и утечки через неплотности канала вентилятора (ветвь 13-10) находятся в параллельном соединении с шахтной вентиляционной сетью, то тогда на основании формулы (4.26) общий показатель режима движения воздуха в вентиляционной сети рудника определится из выражения

$$n_{ВС} = \frac{Q_B}{\frac{Q'_{ш}}{n_{ш.с.}} + \frac{Q_{н.з.}}{n_{н.з.}} + \frac{Q_{кан}}{n_{кан}}} = \frac{Q_B}{\frac{Q_{ш}}{n_{ш}} + \frac{Q_{з.о.} (h_{з.о.} + h_{ВГ})}{n_{з.о.} h_{з.о.} + n_{ВГ} h_{ВГ}} + \frac{Q_{н.з.}}{n_{н.з.}} + \frac{Q_{кан}}{n_{кан}}}, \quad (4.31)$$

где $Q_{н.з.}$ и $n_{н.з.}$ – величина утечек и показатель режима движения при утечках через герметизирующие устройства надшахтного здания вентиляционного ствола; $Q_{кан}$ и $n_{кан}$ – величина утечек и показатель режима движения при утечках через неплотности канала вентилятора и резервный вентилятор.

По формулам (4.17), (4.26), (4.30) и (4.31) с использованием вычисленных по результатам воздушно-депрессионных съемок шахт и аэродинамических испытаний ГВУ значений величин n_i , h_i , Q_i , могут быть определены значения общих показателей режимов движения воздуха в шахтных и вентиляционных сетях рудников.

С другой стороны, общий показатель режима движения в вентиляционной сети рудника $n_{в.с.}$ может быть определен на основании результатов измерений с достаточно высокой степенью точности и Q_e и h_e в

результаты ВДС и др.

Приведенная методика определения общего показателя режима движения в вентиляционных сетях рудников с обрушениями позволяет уточнить закон сопротивления в сети, более надежно определять характеристики сетей рудников, режимы работы ГВУ и показатели эффективности их эксплуатации.

4.3. Снижение проницаемости зон обрушения горных пород путем заполнения порового пространства пород воздухо- и водонепроницаемым составом.

Известно, что обрушенная зона как техногенное нарушение горного массива, которое возникает вследствие выемки полезных ископаемых и проведения выработок, увеличивает фильтрационную способность пород и способствует не только фильтрации утечек (притечек) воздуха нарушающих вентиляционный режим шахт и рудников, но и миграции токсичных веществ с поверхности на значительные глубины [106]. В трещины и поровые каналы при достаточных их размерах может проникать раствор или фильтрат с частицами химических веществ коллоидного размера, которые могут аккумулироваться в обрушенных зонах. Кроме того, в результате коагуляции могут образоваться сложные труднорастворимые и вымываемые комплексы, состоящие из двух и более веществ. Эти процессы связаны с механической и физической поглотительными способностями обрушенных зон.

Определение возможных зон распространения токсичных веществ и их аккумуляция в обрушенных зонах пределах отдельных выработок является задачей технологического прогноза.

Снижение влияния техногенных нарушений (в виде обрушенных зон) на безопасность ведения подземных горных работ происходит в результате уменьшения фильтрационной способности горных пород составляющих зоны обрушений. Одним из способов уменьшения фильтрационной способности горных пород является заполнение порового пространства пород воздухо- и

водонепроницаемым составом. Процесс заполнения такими составами может быть как естественным (с помощью атмосферных осадков), так и искусственным (засыпкой поверхности обрушенных зон мягкими измельченными породами, способных проникать в поровое пространство обрушенных зон под воздействием атмосферных осадков).

Одним из способов уменьшения проницаемости горных пород является искусственная кольматация горных пород.

Кольматация породы-коллектора при воздействии глинистого раствора представляет собой совокупность физического и механического поглощения глинистых частиц, выражающегося в адсорбционном взаимодействии глинистых частиц со скелетом породы, коагуляции и структурообразовании самих глинистых и в «застревании» частиц и агрегатов в порах породы.

Результаты кольматации (эффективность кольматации) – глубина закольматированного слоя и уменьшение коэффициента фильтрации – зависят от фильтрационных свойств породы-коллектора, а также от минерального состава и размеров частиц глин-кольматантов, которые используются.

Частицы глин-кольматантов характеризуются их дисперсностью и адсорбционной способностью а, следовательно, способностью глинистых частиц проникать в толщу породы и поглощаться породой.

Увеличение дисперсности глин способствует проникновению частиц на большую глубину, а рост адсорбционной способности приводит к большому снижению коэффициента фильтрации.

Распространенные в настоящее время представления о процессе образования зоны кольматирования [92, 97] основаны на двух возможных видах механизма кольматации (первый – кольматация как механическое закупоривание пор дисперсной фазой, второй – механическое блокирование пор с одновременным физико-химическим взаимодействием дисперсной фазы кольматанта с материалом пористой среды). Согласно представлениям о проявлении первого из указанных механизмов кольматации, этот процесс в значительной степени зависит от диаметров частиц кольматанта. При

осуществлении второго механизма кольтатация происходит при любых размерах частиц дисперсной фазы в результате адсорбционного взаимодействия, коагуляции и структурирования самих глинистых частиц в порах коллектора.

Структура пористого коллектора в зоне кольтатации имеет довольно сложное строение. На рис. 4.8 она представлена в несколько упрощенном схематическом виде. В зоне кольтатации могут выделяться поры, целиком заполненные кольтатантом и образующие кольтатирующую среду (пористую среду, заполняющую внутриворонное пространство). В зоне кольтатации выделяются поры и участки пор, где частицы кольтатанта не образуют кольтатирующей среды, а также участки пор, свободные от кольтатации.



Рисунок 4.8 - Схема строения зоны кольтатации:

1 – порода обрушенной зоны; 2 – поры, недоступные кольтатации; 3 – остаточная вода; 4 – кольтатирующая среда; 5 – поры заполненные кольтатантом.

Процессы кольтатации происходят в основном в зонах обрушения с уплотненным поверхностным слоем, аэродинамическое сопротивление которого резко преобладает над сопротивлением остальной части разрушенной горной массы. Такие обрушения образуются при попадании в разрушенную горную массу значительного количества глинистых наносов. В условиях рудных шахт такие обрушения могут возникать при наличии слоя глинистых наносов в 5–8 м и более [63]. В скальных породах, не прикрытых наносами, а также при ведении

работ под карьерами, где в ходе вскрышных работ глинистые наносы были удалены, образуются обрушения не имеющие уплотненного поверхностного слоя, аэродинамическое сопротивление которых складывается из сопротивления заполненных горной массой объемов обрушенных зон.

Искусственную кольматацию горных пород с целью снижения проницаемости обрушенных зон можно реализовать засыпкой поверхности провалов над зоной обрушения [111, 112]. Толщина засыпки (рис. 4.9) должна быть не менее 3 м. Борта провалов должны иметь пологие склоны.

Для засыпки провалов используют рыхлые отложения, расположенные в непосредственной близости от провалов и трещин. Работы выполняются бульдозером, который со стороны лежачего бока пласта послойно срезает грунт и перемещает его в провал. Минимальная мощность наносов, оставленных над коренными породами, должна быть не менее 3 м.

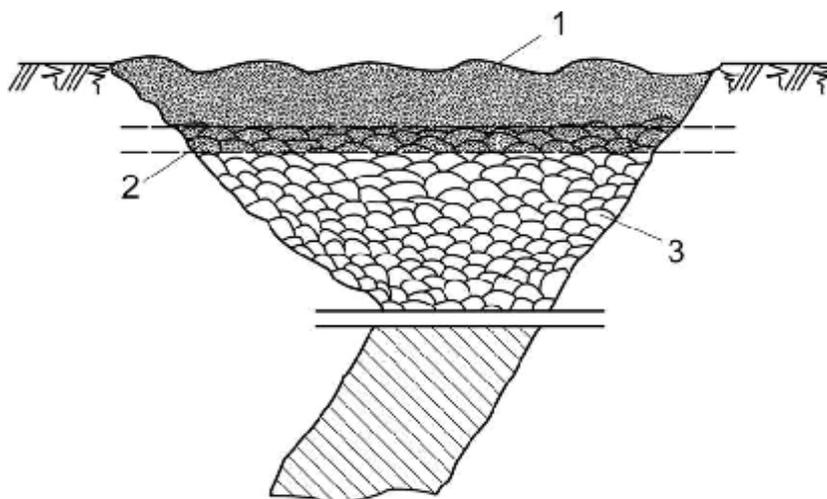


Рисунок 4.9 - Схема герметизации зоны обрушения: 1 –кольматирующая среда; 2 – зона кольматации; 3 – зона обрушения.

Для засыпки провалов и трещин могут быть использованы глинистые наносы, шахтные породы, отсеvy и другие материалы, в которых не содержатся горючие вещества. Перед засыпкой необходимо взрывным способом ликвидировать навесы и произвести выполаживание бортов.

При мощности наносов до 3 м засыпку провалов следует производить привозным грунтом. Для этой цели породу автосамосвалами транспортируют и складывают по бортам провала, а затем бульдозерами перемещают в провал. После заполнения провала материал уплотняют бульдозерами, а склоны отвала выполаживают. Над породами делают изолирующую подушку из глины толщиной не менее 3 м, которую укатывают бульдозером или катком.

Для сокращения сроков работ по изоляции, привозной материал целесообразно размещать в районе выходов пластов, чтобы в дальнейшем его переместить в образовавшиеся провалы.

Работу по засыпке провалов необходимо вести круглый год.

Мерзлую корку наносов в зимнее время следует рыхлить. Материал для засыпки провалов нужно заготавливать по мере их образования. Промерзшую корку целесообразно рыхлить буровзрывным способом, при этом скважины следует располагать так, чтобы при их взрывании исключалось образование больших глыб.

Рыхление корки производится на площади, ширина которой равна ширине траншеи, образуемой бульдозером (3-3,5 м), а длина не более 40 м. Взорванная корка перемещается бульдозером в провал, сверху насыпаются рыхлые отложения, разрабатываемые бульдозером в образовавшейся траншее. Разработка талых пород ведется непрерывно, для того, чтобы не допускать промерзания. Одновременно производится бурение скважин для следующей траншеи.

Для засыпки в зимнее время целесообразно вдоль обрушений в местах образования провалов заранее (летом) заготавливать материал в штабелях. При образовании провалов они заполняются заготовленным материалом. Летом на этих участках производят чистку и выравнивание поверхности. На поверхностях, где отсутствуют наносы, штабеля можно создавать из привозных негорючих материалов, в том числе из рыхлых глинистых пород. Объем и размеры штабелей принимаются по маркшейдерским данным. Материал для засыпки провалов обычно не требует сортировки. Если коренные породы представлены, в основном, крупными кусками и рыхлые отложения над зонами обрушений

имеют незначительную мощность (менее 3 м), то при закладке штабеля добавляются мелкий материал. Штабеля формируют бульдозерами, скреперами, экскаваторами и автосамосвалами.

При крепких труднообрушаемых породах кровли и наносах мощностью менее 3 м целесообразно производить выполаживание бортов и частичную засыпку провалов взрывным способом. Взрывные работы производят с применением скважин, котловых и камерных зарядов.

При засыпке провалов воздухопроницаемыми породами, над ними следует создавать изоляционные слои из глинистых наносов толщиной не менее 3 м. Засыпка провалов и трещин преследует не только ликвидацию аэродинамической связи горных работ с поверхностью, но и выравнивание (восстановление) земной поверхности. После окончания работ следует производить ее планировку.

Для снижения проницаемости обрушенных зон могут применяться также пленочные материалы, закладываемые в зонах обрушения [107].

4.4. Выводы.

Основные результаты исследований изложенных в настоящем разделе сводятся к следующему:

- установлено, что достоверность и надежность проектных вентиляционных параметров может быть значительно повышена за счет учета влияния аэродинамических параметров обрушений, как одной из ветвей вентиляционных сетей рудников с аэродинамически активными обрушениями;
- разработана методика определения режима движения воздуха в вентиляционных системах рудников с учетом режима фильтрации через зону обрушения, позволяющая уточнять закон сопротивления в сети, более надежно определять характеристики сетей рудников, режимы работы ГВУ и показатели эффективности их эксплуатации;
- на основании проведенного факторного эксперимента получена

математическая модель управления утечками воздуха через зону обрушения, позволяющая определять режимы вентиляторов главного проветривания, при которых обеспеченность свежим воздухом подземных потребителей будет наиболее близка к расчётной, а подачи вентиляторов будут равны между собой, при этом внешние утечки будут минимальными;

- разработан способ снижения проницаемости зоны обрушения горных пород, отличающийся тем, что для снижения проницаемости горных пород в зону обрушения вводится специальный раствор, при воздействии которого происходит процесс адсорбционного взаимодействия частиц раствора со скелетом породы, коагуляция и структурообразование соединений раствора и «застревании» частиц и агрегатов в порах породы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе, являющейся законченной научно-исследовательской работой, осуществлено решение актуальной научной задачи установления закономерностей процесса фильтрации утечек воздуха через аэродинамически активные зоны обрушений рудников Кривбасса, с учетом свойств пористой среды и режима движения газа в ней, позволяющей прогнозировать величину утечек воздуха и динамику токсичных примесей в обрушенных зонах, разрабатывать методы и средства повышающие эффективность проветривания горных выработок железорудных шахт.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ аэродинамически активных зон обрушений, на основании которого установлено, что основными параметрами обрушенной зоны массива, влияющими на вероятность изменения параметров рудничной атмосферы в горных выработках или инцидента по газодинамическим условиям, является ее объём в зоне сдвижения горного массива, количество и пространственно-временное распределение вредных примесей в обрушенном пространстве, фильтрационные свойства пород в пределах обрушений.

2. Выполнен анализ проведенных ранее исследований аэродинамических параметров обрушений, который свидетельствует о том, что большая часть их базируется на использовании двучленного закона сопротивления, в который вводятся геометрические характеристики кусковой среды. Однако наличие широкого диапазона фракционного состава пород в зонах обрушения рудников и отсутствие методов его учета приводит к значительным погрешностям при расчетах величин аэродинамического сопротивления и фильтрационных утечек.

3. Установлено, что улучшение состояния рудничной атмосферы на рабочих местах в железорудных шахтах, как в техническом, так и в гигиеническом аспектах, возможно только при наличии достоверных данных о механизме переноса газообразных примесей через пористую среду обрушенных зон. Эти

данные позволят достаточно точно прогнозировать режимы движения газовой смеси, которые, при определенных условиях, могут оказывать значительное влияние на состояние рудничной атмосферы и создавать способы управления фильтрационными процессами в аэродинамически активных обрушенных зонах, примыкающих к горным выработкам.

4. На основании выполненного анализа схем фильтрационных течений в трещиновато-пористых средах зон обрушения горных пород, обоснована физическая модель одномерных фильтрационных потоков при установившихся и неустановившихся режимах движения, позволяющая обеспечить адекватное математическое описание процесса миграции флюидов в обрушенном массиве горных пород.

5. В результате выполненных теоретических исследований предложены математические модели процесса фильтрации воздуха в аэродинамически активных зонах обрушения горных пород, позволяющие с учетом общей теории движения газов в пористых средах, исследовать процессы взаимодействия фильтрационных потоков с поровым пространством обрушенной породы в горном массиве.

6. Установлены основные закономерности фильтрационного движения воздуха через аэродинамически активные зоны обрушений рудников Кривбасса при прямолинейно-параллельном и плоскорадиальном потоке, с учетом свойств пористой среды и режима движения газа в ней.

7. Установлен характер изменения режимов фильтрации газов в зависимости от гранулометрического состава пористой среды; проведенные исследования по определению влияния гранулометрического состава пористой среды на режим движения воздуха в ней показали, что с уменьшением крупности горных пород снижается ее пористость и уменьшается показатель режима движения воздуха.

8. Получены экспериментальные зависимости показателя режима движения воздуха через смеси различного гранулометрического состава пород от процентного содержания определяющего класса, которые достаточно хорошо

согласуются с физическими представлениями о фильтрационных процессах в аэродинамически активных зонах обрушения при прохождении через них атмосферного воздуха и позволяют прогнозировать режимы движения воздуха через пористые среды с различным фракционным составом.

9. В результате экспериментальных исследований получены качественные и количественные характеристики процесса фильтрации газа через пористые среды обрушенных зон с различными свойствами, свидетельствующие о том, что при движении газа по порам обрушенного пространства, возникают сильные возмущения, обусловленные чрезвычайно сложной конфигурацией пор, что, в свою очередь, приводит к отклонению от закона Дарси при сравнительно малых числах Re .

10. Установлено, что основным фактором, оказывающим влияние на изменение сопротивления пористой среды зоны обрушения, является процесс коагуляции, происходящий при фильтрации жидкости (в результате атмосферных осадков) с содержанием мелких взвешенных в ней частиц через поверхностный слой обрушенной зоны, которые проникают в поровое пространство более крупной горной породы.

11. Разработан метод определения общего показателя режима движения воздуха в вентиляционных системах рудников, позволяющий учитывать процесс фильтрации воздуха через зону обрушения и тем самым повысить достоверность и надежность проектных вентиляционных параметров за счет учета влияния аэродинамических параметров зоны обрушения, как одной из ветвей вентиляционных сетей рудников с аэродинамически активными обрушениями.

12. Разработан метод снижения интенсивности процесса фильтрации воздуха в зоне обрушения обеспечивающий создание «нулевой» зоны перепада давлений между горными выработками и поверхностью за счет определения режимов работы вентиляторов главного проветривания, при которых обеспеченность свежим воздухом подземных потребителей будет наиболее близка к расчётной.

14. Разработан способ снижения проницаемости зоны обрушения горных пород, отличающийся тем, что для снижения проницаемости горных пород в зону обрушения вводится специальный раствор, при воздействии которого происходит процесс адсорбционного взаимодействия частиц раствора со скелетом породы, коагуляция и структурообразование соединений раствора и «застревание» частиц и агрегатов в порах породы.

Использование результатов диссертационной работы позволяет повысить обоснованность и точность проектных решений по вентиляции рудников, в практике организации и оперативного проветривания вентиляцией существенно повысить уровень безопасности подземных горных работ и снизить энергоёмкость вентиляционных режимов железорудных шахт Кривбасса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Повышение эффективности управления вентиляционными режимами железорудных шахт Украины: монография / В.И. Голинько, И.А. Евстратенко, Г.П. Кривцун, Л.И. Евстратенко. – Кривой Рог: Вид. «Діоніс», 2012. – 172 с.
2. Евстратенко Л.И. Гірничорятувальна справа на гірничорудних підприємствах: монографія / І.А. Євстратенко, І.Б. Ошмянський, Л.І. Євстратенко. - Кривий Ріг: вид. ФО-П Чернявський Д.О., 2012. - 338 с.
3. Yevstratenko L.I. Substantiation of parameters of filtration flows in mining collapsed areas / L.I. Yevstratenko, I.B. Oshmyansky // Mining of mineral deposits / V. Bondarenko, I. Kovalevs'ka, & Ganushevych – London: Taylor & Francis Group, (Annual scientific-technical collection), 2014. – P. 373 – 378.
4. Евстратенко Л.И. Проблемы повышения эффективности функционирования вентиляционных систем при добыче руды с глубоких горнорудных шахт / Ошмянский И. Б., Евстратенко Л. И. – Проблемы недропользования. Сб. науч. тр. Часть I.- Санкт-Петербург, 2013. – С. 99-101.
5. Евстратенко Л.И. Исследование фильтрации воздуха в пористой среде обрушенных зон рудников Кривбасса / Л.И. Евстратенко, А.А. Юрченко // Зб. наук. пр. Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки) / Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2014. – Випуск 2(25). – С. 193-197.
6. Евстратенко Л.И. Применение методов планирования промышленных экспериментов для решения задач управления проветриванием шахт/ Л.И. Евстратенко, А.А. Юрченко, Е.В. Столбченко // Геотехнічна механіка: міжвід. зб. наук. пр. / Ін-т геотехн. Механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Д., 2014. – № 120. – С. 213-223.
7. Евстратенко Л. И. Снижение утечек воздуха через зону обрушения путем смещения точки нулевой депрессии в сети горных выработок / Л.И. Евстратенко, А.А. Юрченко // Современные технологии и экологическая безопасность использования гранулированных и эмульсионных взрывчатых веществ: тезисы

докл. XI Междунар. научн. –техн. конф., 1 – 2 фев. 2015 г., г. Свалява. - Материалы конференции. – Кременчуг: КрНУ, 2015. – С. 13-16

8. Евстратенко Л.И. Создание и внедрение высокоэффективных технических решений и схем, обеспечивающих надежное проветривание горных выработок при их проходке буровзрывным способом / В.М. Рясной, М.А. Митина, Л.И. Евстратенко // Форум гірників-2012: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф., 2 – 5 жовт., 2012 р., м. Дніпропетровськ. Д.: М-во освіти і науки України; нац. гірн. ун-т., 2012. – Т. 4.– С. 116-121.

9. Евстратенко Л.И. Источники тепловой энергии для обогрева производственных помещений на карьерах // Л.И. Евстратенко, Г.П. Кривцун // Наукова весна – 2012: Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених (Дніпропетровськ, 29 березня 2012 року). Д.:Державний ВНЗ “НГУ”, 2012.–С. 197-198.

10. Керівництво з комплексного обстеження вентиляції шахт, інших підземних об'єктів та підвищення ефективності провітрювання. Нормативний акт охорони праці. Редакційна комісія: Ошмянський І.Б., Лапшин О.Є., Євстратенко І.А., Куроченко В.М., Філянін Є.В., Євстратенко Л.І., 2015 р. - 60 с.

11. Гершун О.С. Движение воздуха через обрушения шахт Кривбасса / О. С. Гершун // Известия ДГИ. – т. 40. – 1961. С. 26-29.

12. Ярцев В.А. Аэродинамическое сопротивление обрушений / В. А. Ярцев // Горный журнал. Известия ВУЗов. – №2. – 1966.– С. 50-56.

13. Ушаков К. З. Газовая динамика шахт / К. З. Ушаков. – М.: Издательство МГГУ, 2004. – 481 с.

14. Черных А.Д. Открыто-подземная разработка рудных месторождений / А. Д. Черных, Б. Н. Андреев, И. Б. Ошмянский / Научно-учебное электронное издание / – Киев: Техніка, 2010. – 574 с.

15. Постникова М.Ю. Влияние выработанных пространств рудников на процесс реверсии воздушных струй в горных выработках / М. Ю. Постникова, Н. М. Качурин // Известия ТулГУ. Науки о земле. – Вып.3. – Тула: 2010. – С. 110 – 115.

16. Сашурин А.Д. Сдвигение горных пород на рудниках черной металлургии / А.Д. Сашурин – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1999. – 268 с.
17. Кузнецов М. А. Сдвигение горных пород на рудных месторождениях / М. А. Кузнецов, А. Г. Акимов, В. И. Кузьмин В. И. и др. // – М.: Недра, 1971. – 224 с.
18. Басниев К.С. Подземная гидромеханика / К.С. Басниев, И. Н. Кочина, В. М. Максимов. – М.: Недра, 1993. – 416 с.
19. Зигель В. Фильтрация / В. Зигель – М.: ГОНТИ, 1939. – 172с.
20. Ромм Е. С. Структурные модели порового пространства горных пород / Е. С. Ромм – Л.: Недра, 1985. – 240 с.
21. Сваровская Н.А. Физика пласта: учебное пособие / Н.А. Сваровская – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 155 с.
22. Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований / В. Д. Ломтадзе. – М.: Недра, 1990. – 248 с.
23. Вендельштейн Б.Ю. Петрофизика (Физика горных пород) / Б. Ю. Вендельштейн, В. М. Добрынин, Д. А. Кожевников. – М.: Нефть и газ 2004. – 368 с.
24. Спивак А.И. Разрушение горных пород при бурении скважин /А.И. Спивак, А.Н. Попов.- М.: Недра, 1994 – 208 с.
25. Савенко С. К. Аэрогазодинамика массовых взрывов в рудниках / С. К. Савенко, Е. Г. Морозов, В. И. Бережной. – М.: Недра, 1976. – 184 с.
26. Луговский С. И. Проветривание шахт после массовых: взрывов / С. И. Луговский. – М.: Металлургиздат, 1958. - 272 с.
27. Котяхов Ф. И. Взаимосвязь между основными физическими параметрами песчаных пород / Ф. И. Котяхов // . НХ. – 1949. – № 12. С. 67 – 73.
28. Эфрос Д.А. Исследование фильтрации неоднородных систем / Д.А. Эфрос. – М.: Гостехиздат, 1963. – 350 с.
29. Бжицких Т.Г. Определение физических и фильтрационно-емкостных свойств горных пород: практикум для выполнения учебно-научных работ студентами направления «Прикладная геология» и «Нефтегазовое дело» / Т.Г.

Бжицких, С.Ф. Санду, Н.Э. Пулькина – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 90 с.

30. Лейбензон Л.С. Собрание трудов, т. II. Подземная гидрогазодинамика, подземная гидравлика / Л.С. Лейбензон – М.: Изд. АН СССР, 1953. – 456 с.

31. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде / Л.С. Лейбензон – М.: Гостехиздат, 1947. – 286 с.

32. Шейдеггер А. Е. Физика течения жидкостей через пористые среды / А. Е. - М.: Наука, 1967. – 321 с.

33. Бан А. Богомоллова А. Ф., Максимов В. А., Николаевский В. Н., Оганджянц В. Г., Рыжик В. М. Влияние свойств горных пород на движение в них жидкости / А. Бан, А. Ф. Богомоллова, В. А. Максимов и др. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – 275 с.

34. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика / И.А. Чарный. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. –436 с.

35. Бэр Я. Физико-математические основы фильтрации воды/ Я. Бэр, Д. Заславски, С. Ирмей – М.: Мир, 1971. – 451 с.

36. Сулейманов Б. А. Особенности фильтрации гетерогенных систем / Б. А. Сулейманов. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006 – 356 с.

37. Ильницкая Е.И. Свойства горных пород и методы их определения / Е.И. Ильницкая – М.: Недра, 1973 – 358 с.

38. Кобранова В.Н. Петрофизика / В.Н. Кобранова – М.: Недра, 1986. – 392 с.

39. Лапинская Т.А. Основы петрографии /Т.А. Лапинская, Б.К. Прошляков. - М.: Недра, 1981. – 232 с.

40. Минский Е. М. Статистическое обоснование уравнений фильтрационного движения / Е. М. Минский // Докл. АН СССР, т.118. – 1958. – №2. – С. 255-258.

41. Гафаров Ш.А. Физика нефтяного пласта / Ш.А. Гафаров и др. – Уфа: УГТНУ, 1999. – 86 с.

42. Котяхов Ф.И. Анализ керна нефтяных месторождений / Ф. И. Котяхов, Б. Ф. Ремнев, Н. Н. Буторин. – М.-Л.: Гостоптехиздат, 1948. - 130 с.
43. Лейбензон Л.С. Нефтепромысловая механика Ч. 1. / Л. С. Лейбензон. – Госгеонефтеиздат, 1934. – 678 с.
44. Накоряков В.Е. Ламинарная струя в «узкой» щели при больших числах Рейнольдса / В.Е. Накоряков, Н.Н. Яичникова // ЖПМТФ. – 1985. – №5. – С. 20-29.
45. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации: Учебное пособие. / Н. Е. Леонтьев. – М: Изд-во Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2009. – 88 с.
46. Чарный И. А. Основы подземной гидравлики / И. А. Чарный. – М.-Л.: Гостехиздат, 1956. – 260 с.
47. Минский Е. М. О турбулентной фильтрации в пористых средах / Е. М. Минский // – М.: ДАН СССР – 1951. – т. 78. – № 3. – С. 409–412.
48. Engelund F. On the Laminar and Turbulent Flows of Ground Water through Homogeneous Sand / Transactions of the Danish: Academy of Technical Sciences – 1953. – № 3. – P. 356 – 361.
49. Котяхов Ф.И. О режимах фильтрации в пористой среде / Ф.И. Котяхов // Труды АНП. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – Вып. 1. – С. 59–66.
50. Николаевский В.Н. Капиллярная модель диффузии в пористых средах / В.Н. Николаевский // Известия АН СССР, ОТН. Сер. Механика и машиностроение. – 1959. – № 4. С. 146–149.
51. Квеско Б.Б. Подземная гидромеханика / Б.Б. Квеско – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 181 с.
52. Пятибрат В.П. Подземная гидромеханика. Учебное пособие / В.П. Пятибрат. – Ухта: УГТУ, 2002. – 100 с.
53. Darcy H. Les fontaines publiques de la ville de Dijon / H. Darcy. – Paris: 1856. – 647 p.
54. Краснопольский А. А. Грунтовые и артезианские колодцы / А.А. Краснопольский // Горный журнал – №3. – 1912. С. 131–138.

55. Жаворонков Н. М. Гидравлические основы скрубберного процесса и теплопередача в скрубберах / Н. М. Жаворонков – М.: Госиздат «Советская наука», 1944. – 224 с.

56. Пучков Л. А. Режим движения воздуха в выработанном пространстве / Л. А. Пучков // Изв. вузов. Горный журнал – №1. – 1965. С. 70-75.

57. Шашмурин Ю. А. Фильтрационные утечки рудничного воздуха / Ю.А. Шашмурин. – Ленинград: Наука, 1970. – 130 с.

58. Минц Д.М. Гидравлика зернистых материалов / Д.М. Минц, С.А. Шуберт – М.: МКХ РСФСР, 1955. – 110 с.

59. Минский Е. М. О турбулентной фильтрации газа в пористых средах / Е.М. Минский // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института природных газов. Вопросы добычи, транспорта и переработки природных газов. – М.: Гостоптехиздат, 1951. – 332 с.

60. Пучков Л.А. О формуле закона сопротивления и методике расчета аэродинамических характеристик пористой среды зоны обрушения / Л.А. Пучков, С.П. Алехичев / В кн.: Технология разработки рудных месторождений Заполярья / – М.-Л.: Наука, 1964. – 152 с.

61. Милетич А.Ф. Утечки воздуха и их расчет при проветривании шахт / А.Ф. Милетич. – М.: Недра, 1968. – 148 с.

62. Шашмурин Ю. А. Исследование влияния зоны обрушения на общешахтный режим движения воздуха / Ю.А. Шашмурин, В.Д. Луковский / В кн.: Физика и технология разработки недр / – М.-Л.: Наука. – 1965. С. 25-33.

63. Ярцев В.А. К вопросу о прогнозе изменения величины аэродинамического сопротивления обрушений при увеличении глубины разработки / В. А. Ярцев // Известия вузов. Горный журнал. – 1966. – № 4. – С. 47-54.

64. Ярцев В. А. Экспериментальное определение аэродинамического сопротивления общего комплекса обрушений шахты "Южная" Гороблагодатского рудника / В. А. Ярцев // Горный журнал. – №6. – 1962. С. 43-45.

65. Евстратенко Л.И. Исследование влияния литологического состава горных пород на проницаемость пористой среды и режимы фильтрации воздуха

в обрушенных зонах / Л.И. Евстратенко // Зб. наук. пр. НГУ.– 2014. – № 45. – С.129-137.

66. Евстратенко Л.И. Дослідження режиму руху повітря в зонах обвалень рудників Кривбасу / Л.И. Евстратенко // Геотехнічна механіка: міжвід. зб. наук. пр. / Ін-т геотехн. Механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Д., 2014. – № 117. - С. 121-127.

67. Ошмянский И. Б. Расчет величины фильтрационных утечек воздуха через зоны обрушения для условий рудников Кривбасса / И. Б. Ошмянский, А. Е. Лапшин // Изв. вузов. Горный журнал. – №4. – 1974. – С. 69-73.

68. Ошмянский И. Б. Закон сопротивления при движении воздуха через зоны обрушения рудников Кривбасса / И. Б. Ошмянский, А. Е. Лапшин, О. В. Лось // Изв. вузов. Горный журнал. – №6. – 1975. – С. 62-67.

69. Ошмянский И. Б. Аэродинамические параметры фильтрационного движения воздуха в обрушениях рудников Кривбасса / И. Б. Ошмянский, А. Е. Лапшин, И. Т. Овчинник // Изв. вузов. Горный журнал. – №4. – 1979. – С. 73-76.

70. Ошмянский И. Б. Распределение аэродинамических параметров фильтрации в обрушениях рудников Кривбасса / И. Б. Ошмянский, А. Е. Лапшин // Вентиляция шахт и рудников. – Л.:ЛГИ, 1980. – вып. 7. – С. 46-49.

71. Брунауэр С. Адсорбция газов и паров / С. Брунауэр – М.: Иностран. лит., 1948. – 653с.

72. Шевелев Г.А. Фильтрация газа в шахтах / Г.А. Шевелев, В.Т. Перепелица. – К.: Наукова думка, 2010. – 291 с.

73. Лыков А.В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю.А. Михайлов – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.

74. Баренблатт Г. И. Движение жидкостей и газов в природных пластах / Г.И. Баренблатт, В.М. Ентов, В.М. Рыжик – М.: Недра, 1984. – 211 с.

75. Басниев К.С. Подземная гидромеханика/ К.С. Басниев, Н.М. Дмитриев, Р.Д. Каневская, В.М. Максимов. – М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. –496 с.

76. Сологаев В.И. Гидравлика (механика жидкости и газа) / В.И. Сологаев. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2010. – 64с.
77. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде / М. Маскет – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 628 с.
78. Требин Г. Ф. Фильтрация жидкостей и газов в пористых средах / Г.Ф. Требин – М: Гостоптехиздат, 1959. – 156 с.
79. Наказная Л.Г. Фильтрация жидкости и газов в трещиноватых коллекторах / Л.Г. Наказная. - М.: Недра, 1972. – 186 с.
80. Форхгеймер Ф. Гидравлика / Ф. Форхгеймер. – М.; Л.: ОНТИ, 1935. – 616 с.
81. Аравин В. И. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде / В. И. Аравин, С. Н. Нумеров – М.: Гостехиздат, 1953. – 616 с.
82. Великанов М. А. Движение подземных вод в крупнозернистых грунтах / М. А. Великанов. - М.: Известия АН УССР №7-8, 1945, с. 33-36.
83. Евстратенко И.А. Моделирование газодинамических явлений в обрушенных пространствах после массовых взрывов / И.А. Евстратенко // Сб. научных тр. НГУ, № 19, т.3. – Днепропетровск: 2004. – С. 43 – 56.
84. Сахновский В.Л. Интенсификация проветривания глубоких подземных рудников / В.Л. Сахновский, А.Е Умнов, В.М. Куроченко – М.: Недра, 1992. – 143 с.
85. Аерологія гірничих підприємств / А.О. Гурін, П.В. Бересневич, А.А. Немченко и др. – Кривий Ріг: Видавничий центр КТУ, 2007. – 462 с.
86. Ентов В.М. Теория фильтрации / В.М. Ентов // Соросовский образовательный журнал. – №2. – 1998. С. 121–128.
87. Евстратенко Л.И. Влияние гранулометрического состава пористой среды аэродинамических зон обрушений Кривбасса на режимы фильтрации воздуха / Л.И. Евстратенко // Гірничий вісник / Кривий Ріг: ДВНЗ “Криворізький національний університет”. – 2015. – Вип. 99.– С. 69-74.
88. Lewis G.N. Thermodynamics / G.N. Lewis, M. Randall. –New York: Van Nostrand Company, 1923. – 162 p.

89. Щелкачев В.Н. Подземная гидравлика / В.Н. Щелкачев, Б.Б. Лапук – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 736стр.
90. Абрамов Ф.А. Рудничная аэрогазодинамика / Ф.А. Абрамов. – М.: Недра, 1972. – 272с.
91. Алборов И.Д. Аэродинамическое сопротивление зон обрушения / И.Д. Алборов, Ч.М. Худиев // Безопасность труда в промышленности. – № 3.–1995. – С. 23-27.
92. Требин Ф.А. Нефтепроницаемость песчаных коллекторов / Ф.А. Требин. – М.: Гостоптехиздат. 1945. – 98 с.
93. Boussinesq J. V. Theorie de l'intumescence liquide, appelee onde solitaire ou de translation, se propagent dans un canal rectangulaire / Comptes Rendus Acad. Sci. Paris. 1871. - V. 72. - P. 755-759. (фр.)
94. Луговский С. И. Проветривание глубоких рудников / С.И. Луговский . – М.: Госгортехиздат, 1962. – 323 с.
95. Ушаков К.З. Аэрология горных предприятий / К.З. Ушаков, А.С. Бурчаков, Л.А. Пучков и др. // М.: Недра, 1987. – 421 с.
96. Ковалева Л.А. Физика нефтегазового пласта / Л.А. Ковалева. – Уфа: РИО БашГУ, 2008. – 280 с.
97. Орнатский Н.В. Исследование процесса кольматации песков / Н.В. Орнатский, Е.М. Сергеев, Ю.М. Шехтман. – М.: Изд-во МГУ, 1955. – 140 с.
98. Основы технологии добычи газа / А.Х. Мирзаджанзаде, О.Л. Кузнецов, К.С. Басниев и др.// – М.: ОАО «Издательство «Недра», 2003. – 880 с.
99. Совершенствование разработки и вентиляции рудников / С.И.Луговский, Э.И. Шкута, И.Б. Ошмянский и др. Недра, 1968. – 302 с.
100. Слюсаренко В.Г. Состояние и проблемы вентиляции рудников Кривбасса / В.Г. Слюсаренко, И.Б. Ошмянский // Изв. вузов. Горный журнал. – №8. – 1982. – С. 65-70.
101. Засименко В.М. Основи теорії планування експерименту / В.М. Засименко – Львів: Держ. ун-т «Львівська політехніка», 2000. – 204с.

102. Пінчук С.И. Організація активного експерименту. Навч. посібник / С.И. Пінчук, І.Г. Рослик; Нац. Металургійна академія України. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2003. – 87 с.

103. Адлер Ю.П. Планирование экспериментов при поиске оптимальных условий / Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. – М.: Наука, 1976. - 238с.

104. Смоланов С.Н. Ликвидация сложных подземных аварий методами вентиляционного воздействия / С.Н. Смоланов. – Днепропетровск: Наука и образование, 2002. – 272 с.

105. Овчинников В.Ф. Предупреждение взрывов при изоляции подземных пожаров в газовых шахтах / В.Ф. Овчинников. – М.: «Недра», 1964. – 148 с.

106. Голинько В.И. Аварийно-спасательные работы в шахтах / В.И. Голинько, С.А. Алексеенко, И.Н. Смоланов – Днепропетровск: Лира, 2011. – 480 с.

107. Ярцев В.А. Аэродинамический анализ простейших гетерономных соединений / В.А. Ярцев // Изв. вузов. Горный журнал. – №10. – 1964. – С. 61-67.

108. Тянь Р.Б. Управление проветриванием шахт / Р.Б. Тянь, В.Я. Потемкин – Киев: Наукова думка, 1977. – 204 с.

109. Бунько Т.В. Совершенствование метода расчета концентраций метана по сети горных выработок, включающих рассредоточенные источники метановыделения / Т.В. Бунько, И.Е. Кокоулин, А.Ш. Жалилов, А.Б. Бокий // Геотехнічна механіка: міжвід. зб. наук. пр. / Ін-т геотехн. Механіки ім.. М.С. Полякова НАН України. – Д., 2014. – № 120. - С. 31-43.

110. Бунько Т.В. Совершенствование метода расчета реконфигурируемых шахтных вентиляционных систем с использованием параллельных вычислений / Т.В. Бунько, И.Е. Кокоулин, А.Ш. Жалилов, А.Б. Бокий // Геотехнічна механіка: міжвід. зб. наук. пр. / Ін-т геотехн. Механіки ім.. М.С. Полякова НАН України. – Д., 2014. – № 119. - С. 87-99.

111. Геомеханические основы предотвращения провалов земной поверхности при ликвидации шахт / Звягильский Е. Л., Минаев А. А., Назимко В. В., Александров С.Н., Пенг С. С. – Донецк: ООО «НОРД Компьютер», 2001. – 334 с.

112. Должиков П.Н. Исследования процесса ликвидации провала земной поверхности над горной выработкой / П.Н. Должиков, Д.В. Корсаков // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета № 34. – Алчевск, 2011. – С. 14–20.



ЗАТВЕРДЖУЮ:

В.о. проrektора з наукової роботи
ДВНЗ «Криворізький
національний університет»
д.т.н. професор
В.С.Моркун
_____ 2015 р.

Довідка

про використання результатів дисертаційної роботи
Євстратенко Лілії Ігорівни «Підвищення ефективності вентиляції рудників
Кривбасу з аероактивними зонами обвалення»

Результати наукових досліджень за темою дисертації Євстратенко Лілії Ігорівни «Підвищення ефективності вентиляції рудників Кривбасу з аероактивними зонами обвалення» знайшли застосування у навчальному процесі при викладанні дисциплін «Аерологія гірничих підприємств» та «Проектування вентиляції» напряму підготовки гірництва для студентів спеціальностей «Охорона праці» освітньо-кваліфікаційних рівнів «бакалавр», «спеціаліст», «магістр» і можуть бути використані й іншими навчальними закладами України.

Розроблено Практичну роботу №5 «Проект підрахунку необхідної кількості повітря для проектування глибоких гірничорудних шахт в умовах Кривбасу» та Практичну роботу №6 «Проект підрахунку депресії в загальношахтних мережах глибоких гірничорудних шахт з аеродинамічними зонами обвалення» з дисципліни «Проектування вентиляції»

Результати досліджень використані при розробці нормативного акту охорони праці «Керівництва з комплексного обстеження вентиляції шахт, інших підземних об'єктів та підвищення ефективності провітрювання» (НАОП-2014).

Завідувач кафедри
рудникової аерології та охорони праці
д.т.н. професор

А.О.Гурін

Завідувач навчально-методичного відділу

Г.Х.Отверченко

НОРМАТИВНИЙ АКТ ОХОРОНИ ПРАЦІ

ПОГОДЖЕНО



КЕРІВНИЦТВО

З КОМПЛЕКСНОГО ОБСТЕЖЕННЯ ВЕНТИЛЯЦІЇ ШАХТ,
ІНШИХ ПІДЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ ТА ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОВІТРЮВАННЯ

КЕРІВНИЦТВО З КОМПЛЕКСНОГО ОБСТЕЖЕННЯ ВЕНТИЛЯЦІЇ ШАХТ, ІНШИХ ПІДЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОВІТРЮВАННЯ

РОЗРОБЛЕНО ДВНЗ «Криворізький національний університет» (КНУ);
«Науково-дослідний інститут безпеки праці та охології в гірничорудній та металургійній промисловості» («НДІВПГ» КНУ);
Криворізький воєнізований гірничорудничий загін (КВГРЗ).

ВНЕСЕНО Державною службою гірничого нагляду та промислової безпеки України

ВВЕДЕНО З введенням в дію цього «Керівництва» втрачає чинність «Руководство по комплексному обследованию вентиляции шахт Минчермета СССР и мероприятия по повышению ее эффективности», Кривой Рог, 1986 г.

РЕДАКЦІЙНА КОМІСІЯ
Ошмянський І.Б., Лапшин О.С., Свєстратенко І.А., Куроченко В.М., Філіпін С.В., Свєстратенко Л.І.

ВІДЛЮВДАЛЬНИ ЗА ВИПУСК ДВНЗ «КНУ» «НДІВПГ» КНУ 5

ЗМІСТ

Перелік	8
Сфера застосування	9
Прийнятні позначення та скорочення	10
1. ПІДГОТОВКА ВИХІДНИХ ДАНИХ І ОРГАНІЗАЦІЯ ПОВІТРЯНО-ДЕПРЕСИЙНИХ ЗЙОМОК	11
1.1. Мета і задачі повітряно-депресійних зйомок вентиляційних мереж та інших підземних об'єктів	11
1.2. Вихідні виробничо-технічні дані підземної розробки	12
1.3. Методика проведення повітряно-депресійної зйомки при нормальній режимі вентиляції	14
1.4. Методика визначення стану провітрювання діючих вибоїв і виробок	17
2. МЕТОДИКА ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ПОВІТРЯНИХ І ПОВІТРЯНО-ДЕПРЕСИЙНИХ ЗЙОМОК	21
2.1. Визначення аеродинамічних параметрів вентиляційних мереж	21
2.2. Визначення аеродинамічних і техніко-економічних параметрів роботи ГВУ при нормальних і аварійних режимах	24
3. ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВЕНТИЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ШАХТИ ПРИ РЕЖИМАХ ПРОВІТРЮВАННЯ, ПЕРЕДБАЧЕНИХ ПЛА	37
4. РОЗРАХУНОК НЕОБХІДНИХ ВИТРАТ ПОВІТРЯ ДЛЯ ПРОВІТРЮВАННЯ ГІРНИЧИХ РОБИТ	30
4.1. Методика повного повільного розрахунку необхідних загальношахтних витрат повітря	30
4.2. Методика розрахунків необхідних витрат повітря для окремих ступенів	36
4.3. Основні результати комплексного обстеження стану вентиляції шахти та ефективності функціонування вентиляційної системи	40
4.4. Математичне забезпечення для обробки матеріалів комплексного обстеження стану вентиляції шахт	43
4.4.1. Математична постановка задач балансування розходжень у вимірах витрат повітря у виробках ШВМ	45
4.4.2. Математична постановка задач балансування розходжень у визначенні депресій виробок	46
4.4.3. Математична постановка і рішення задач розрахунків природного та примусового розподілу повітря в ШВМ	48
5. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ КОМПЛЕКСНОГО ОБСТЕЖЕННЯ ВЕНТИЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ШАХТИ ТА ІНШИХ ПІДЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ	49
5.1. Оцінка стану вентиляції шахти і функціонування вентиляційної системи	49
5.2. Визначення стану вентиляції шахти при аварійних режимах	52
5.3. Анализ результатів депресійної зйомки ШВМ	53
5.4. Оцінка техніко-економічної ефективності роботи і технічного стану ГВУ	54
6. РОЗРОБКА ЗАХОДІВ І РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО ПІДВИЩЕННЮ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОВІТРЮВАННЯ ШАХТИ	57
Список літератури	59