Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

На правах рукописи

Their

Николаев Александр Викторович

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА НА ПОДЗЕМНЫХ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ СРЕДСТВАМИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Специальность: 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность» (горная промышленность)

ДИССЕРТАЦИЯ на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант — член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор КЛИШИН В.И.

Кемерово 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ	8
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ	
И ЭНЕРГОЗАТРАТНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ	
ПРОВЕТРИВАНИЯ РАЗВЕТВЛЕННОЙ СЕТИ	
ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК	19
1.1. Факторы, влияющие на эффективность работы ГВУ	20
1.1.1. Влияние общерудничной (общешахтной)	
естественной тяги на процесс проветривания	
подземного горнодобывающего предприятия	21
1.1.2. Зависимость режимов управления процессом	
проветривания от внешних факторов	25
1.2. Оценка эффективности и безопасности технологий	
воздухоподготовки	26
1.3. Способы управления воздухораспределением	
между горными выработками подземных	
горнодобывающих предприятий	30
1.4. Анализ систем проветривания при возникновении	
нештатных ситуаций	34
1.4.1. Системы управления процессом подачи и распределения	
воздуха при возникновении нештатной ситуации	35
1.4.2. Способы защиты горнорабочих при возникновении пожара	
в подземном горнодобывающем предприятии	38
1.5. Оценка эффективности обеспечения требуемых	
условий труда горнорабочих в добычных участках	
при повышенном значении температуры воздуха в них	43
1.5.1. Способы нормализации микроклиматических	
условий и осушения воздуха на подземных	
горнодобывающих предприятиях	44
1.5.2. Проблемы обеспечения требуемых санитарно-гигиенических	
условий труда в рабочей зоне нефтяных шахт	
1.6. Цель и задачи исследований	50

I JIABA 2. P	АЗРАБОТКА ОСНОВ УПРАВЛЕНИЯ	
ПРОЦЕСС	ОМ ПРОВЕТРИВАНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ	
СЛУЧАЙН	ЫХ ФАКТОРОВ	52
2.1. Прим	енение методов статистического анализа	
при р	ешении задач управления проветриванием	
подзе	емных горнодобывающих предприятий	53
2.2. Оцен	ка значимости факторов, влияющих	
на бе	зопасность процесса проветривания,	
на ос	нове экспериментальных исследований	55
2.2.1.	Порядок сбора и обработки опытных данных и их первичная	
	обработка с целью достоверной интерпретации результатов	
	измерений с учетом стохастического характера	
	воздухораспределения между шахтными стволами	57
2.2.2.	Экспериментальные исследования на действующих подземных	
	горнодобывающих предприятиях при отключении ГВУ	61
2.2.3.	Экспериментальные исследования на действующих	
	подземных горнодобывающих предприятиях при различных	
	режимах работы ГВУ и климатических условиях	64
2.3. Teope	стические основы управления режимом работы ГВУ	
с уче	гом действия случайных возмущающих факторов	74
2.3.1.	Методика расчета величины и направления общерудничной	
	естественной тяги с заданной доверительной вероятность	76
2.3.2.	Управление проветриваниемс учетом инерционности системы	83
2.3.3.	Обработка экспериментальных данных проведенных	
;	экспериментов	89
2.4. Выво	ды по главе	92
ГЛАВА 3. Р	РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ	
И БЕЗОПА	СНЫХ СИСТЕМ ВОЗДУХОПОДГОТОВКИ	94
3.1. Мате	матическое моделирование тепломассопереноса	
В ВОЗД	духоподающих стволах при осуществлении	
	хополготовки в холодное время года	95

3.2. Возду	ухоподготовка в шахтной калориферной установке,	
расп	оложенной в калориферном канале	. 98
3.2.1.	Расчет теплопроизводительности шахтной калориферной	
	установки, расположенной в калориферном канале	99
3.2.2.	Моделирование процесса тепломассопереноса	
	в системе «воздухонагреватель-канал-ствол»,	
	при использовании нагревательных пластин	109
3.3. Сист	гема воздухоподготовки с теплообменниками,	
расп	оложенными по периметру надшахтного здания	114
3.3.1.	Тепловой расчет шахтной калориферной установки,	
	расположенной по периметру надшахтного здания	115
3.3.2.	Тепловое распределение воздушных потоков в случае	
	расположения шахтной калориферной установки	
	по периметру надшахтного здания	122
3.4. Сист	гема воздухоподготовки при использовании	
возду	ушной завесы в воздухоподающих стволах	123
3.5. Испо	ользование дымовых газов с целью повышения	
эффе	ективности при воздухоподготовке	126
3.5.1.	. Способ нагрева воды, подаваемой в систему	
	воздухоподготовки	127
3.5.2.	Тепловой расчет теплообменника	128
3.5.3.	Обоснование применения предлагаемой системы	134
3.6. Выво	оды по главе	135
	УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ВОЗДУХА	
B HOPMA.	ЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ УСЛОВИЯХ	136
4.1. Сред	ства и способы регулирования	
возду	ухораспределения в нормальном режиме	
пров	ветривания (на примере калийных рудников)	136
4.1.1.	Способ проветривания добычных участков при обратном	
	порядке отработки полезного ископаемого	138
4.1.2.	Способ проветривания добычных участков при обратном	
	порядке отработки полезного ископаемого	142

4.1.3. Описание пред	лагаемой конструкции быстровозводимой	
шахтной венти	ляционной перемычки	145
4.2. Средства и способ	ы регулирования воздухораспределения	
в аварийном режи	іме проветривания	149
4.2.1. Оценка степени	и безопасности при возникновении	
нештатной сит	уации на рудниках, использующих	
систему рецирн	куляции воздуха	149
4.2.2. Управление сис	стемой проветривания при возникновении	
аварийных сит	уаций	153
4.2.3. Схемы проветр	ривания добычных участков	
и способы упра	авления воздухораспределеним	
между горнымі	и выработками, обеспечивающие	
защиту горнора	абочих при возникновении пожара	157
4.3. Обеспечение безоп	асности в случае реверса струи воздуха	
в холодное время	года	162
4.4. Выводы по главе		164
ГЛАВА 5. УСТРОЙСТВ	Α ΩΠΕΒΑΤΙΙΡΙΙΩΓΩ	
	УЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ	
, ,	РНЫМИ ВЫРАБОТКАМИ	4
	ВАРИЙНОМ РЕЖИМАХ	165
•	атической и компьютерной	
моделей шахтной	вентиляционной перемычки	
на основе метода н	конечных элементов	166
5.1.1. Краткие основн	ы применяемого метода конечных элементов	167
5.1.2. Разработанные	конечно-элементные модели элементов	
шахтной венти	ляционной перемычки	169
5.2. Моделирование сво	ойств пневморукава шахтной вентиляционі	ной пе-
ремычки при разл	ичных внешних факторах	171
5.2.1. Анализ естеств	венного прилегания пневморукава	
к стенке горной	й выработки без учета восстанавливающей	
силы от внутре	еннего давления	171
5.2.2. Внутренние си.	ловые факторы в криволинейных гибких	
пневморукавах	Восстанавливающая сила	175

5.2.3. Верификация модели пневморукава. Сравнение результатов
моделирования с аналитическим решением
5.2.4. Анализ влияния изгибной жесткости и давления
на деформирование пневморукава с учетом
восстанавливающей силы
5.3. Моделирование нормальных напряжений
на шахтнуювентиляционную перемычку
при изменяющемся давлении воздуха в различных
сечениях горных выработок калийных выработок184
5.3.1. Расчет нагрузок на шахтную вентиляционную
перемычку от давления воздуха
5.3.2. Определение контактных усилий прижатия пневморукава
к стенкам горной выработки192
5.4. Расчет прочности конструкции шахтной вентиляционной
перемычки и ее отдельных элементов197
5.4.1. Математическая постановка задачи деформирования
силового каркаса шахтной вентиляционной перемычки197
5.4.2. Создание конечно-элементной модели конструкции201
5.4.3. Анализ напряженно-деформированного состояния
шахтной вентиляционной перемычки без дополнительных
упоров и примыкания к стенкам выработки202
5.5. Результаты исследования опытного образца шахтной
вентиляционной перемычки207
5.6. Выводы по главе
ГЛАВА 6. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ТРЕБУЕМЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА ГОРНОРАБОЧИХ В ДОБЫЧНЫХ
УЧАСТКАХ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ
ВОЗДУХА В НИХ
6.1. Система кондиционирования воздуха для неглубоких
рудников и технологические решения для рационального
использования энергоресурсов на глубоких подземных
горнодобывающих предприятиях223

б.1.1. Система кондиционирования воздуха на неглуооких	
рудниках и шахтах подземно-поверхностого типа	224
6.1.2. Обеспечение безопасных условий труда на глубоких	
рудника и шахтах	231
6.2. Расчет технологических параметров предлагаемой	
системы кондиционирования воздуха в неглубоких	
рудниках и шахтах	233
6.2.1. Расчет требуемой хладопроизводительности системы	
кондиционирования воздуха и эффективной ее работы	233
6.2.2. Расчет характеристик оборудования системы	
кондиционирования воздуха для обеспечения	
требуемой хладороизводительности при минимальных	
затратах энергоресурсов	236
6.2.3. Применение шахтных калориферных установок	
в теплое время года для кондиционирования воздуха	238
б.3. Исследование и разработка способа обеспечения безопас	сных
и комфортных условий работы в нефтешахтах	241
6.3.1. Способ обособленного проветривания уклонного	
блока нефтяной шахты	242
6.3.2. Система охлаждения и утилизации тепла исходящего	
из буровой галереи нефтяной шахты воздуха	245
6.3.3. Способ автоматизированной подачи воздуха в уклонный	
блок нефтяной шахты, перед проходом в него горнорабоч	их 247
6.3.4. Система обеспечения безопасных условий труда	
в нефтяных шахтах, работающая по принципу	
«бережливого производства»	250
5.4. Выводы по главе	254
КЛЮЧЕНИЕ	257
	······ #3 I
ІИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	260

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Увеличение производительности подземных горных предприятий (ПГП) по добытой горной массе в сочетании с действующими принципами обеспечения промышленной безопасности и защиты жизни и здоровья горнорабочих средствами вентиляции ведет к необходимости дальнейшего повышения количества подаваемого в шахту свежего воздуха, тем самым — к росту энергопотребления.

Уже сегодня на проветривание расходуется от 30 до 50 % всей потребляемой ПГП электроэнергии, а главные вентиляторные установки (ГВУ) работают на пределе своей мощности и производительности.

Процесс проветривания подземных горных выработок требует больших затрат энергоресурсов как на цели вентиляции, так и на выполнение требований правил безопасности, согласно которым предписано в холодное время года нагревать, а в теплое время — охлаждать подаваемый воздух. Ввиду того что применяемые для осуществления нагрева и охлаждения воздуха способы и установки имеют низкий КПД и разрабатывались без учета энерго- и ресурсосбережения, необходимо последовательно добиваться от них выполнения принципов бережливого производства (бережливой вентиляции).

Решение всех вышеперечисленных проблем связано с информатизацией, автоматизацией и цифровизацией процессов подготовки воздуха и его оптимального распределения между рабочими зонами.

Исследованию проблемы обеспечения условий безопасности при проветривании и воздухоподготовке на ПГП посвящены работы С.П. Алехичева, Н.И. Алыменко, А.Д. Вассермана, А.Ф. Воропаева, С.Г. Гендлера, Ю.Д. Дядькина, Б.П. Казакова, Н.О. Калединой, Н.М. Качурина, Ш.Х. Килькеева, В.И. Клишина, В.Б. Комарова, А.Е. Красноштейна, О.А. Кремнева, Ю.В. Круглова, Л.Ю. Левина, И.И. Медведева, Н.Н. Мохирева, Ордина А.А., Д.Ю. Палеева, Н.А. Трофимова, К.З. Ушакова, Г.З. Файнбурга, А.Н. Щербаня, Z. Aitao, W.E. Вгисе, Р.F. Linden и др.

В решение проблемы повышения эффективности проветривания угольных шахт большой вклад внесли: Ф.А. Абрамов, А.И. Бобров, В.Н. Воронов, СП. Казаков, А.Д. Кизряков, Ф.А. Кожанов, В.А. Колмаков, А.И. Ксенофонтов, Г.Д. Лидин, А.А. Мясников, А.А. Скочинский, К.Н. Трубецкой, Д.М. Шередекин, G.Y. Cheng, P. Lagadec, Li. Maoren, J. Wachowicz.

В последующем проблемы метановой опасности и безопасности труда в угольных шахтах получили развитие в работах А.Т. Айруни, Н.К. Бусыгина, В.С. Зыкова, В.Г. Игишева, С.И. Калинина, Е.Ф. Карпова, Ф.С. Клебанова, А.А. Ли, В.И. Мурашева, А.Ф. Павлова, В.Б. Попова, С.А. Прокопенко, В.Н. Пузырева, Б.Г. Тарасова, А.И. Фомина, В.Н. Фрянова, С.В. Черданцева, Л.А. Шевченко, М. Branny, X.X. Kuang, G.E. McElroy, P. Zapletal и многих других.

Одним из основных направлений решения задач обеспечения эффективного и безопасного проветривания является одновременное управление процессом работы ГВУ и другими системами регулирования воздухораспределения и воздухоподготовки.

Актуальность представленной работы обусловлена требованиями разработки энергоэффективных технических и технологических решений для обеспечения проветривания ПГП, которые позволяют обеспечить безопасность при возникновении нештатной ситуаций.

Объект исследований — процессы обеспечения требований промышленной безопасности на подземных предприятиях горнорудной отрасли.

Предметом исследования являются процесс проветривания подземных предприятий горнорудной отрасли при возникновении техногенных опасностей.

Идея диссертационной работы заключается в комплексном учете особенностей работы систем воздухоподготовки, влияющих на безопасность применения энергоэффективных систем воздухоподготовки, способов устойчивого проветривания выемочных участков в условиях переменной естественной тяги, регулирования воздухораспределения между подземными горными

выработками при помощи положительных и отрицательных средств проветривания, а также процесса управления режимами работы ГВУ при изменяющихся внешних возмущающих факторах.

Цель работы — научное обоснование и разработка технических и технологических решений, обеспечивающих промышленную безопасность в нормальном и аварийном режимах проветривания, а также по нормализации рудничной атмосферы в рабочих зонах и обеспечение безопасных и комфортных условий труда горнорабочих путем энергоэффективного проветривания.

Задачи исследования

В соответствии с целью при выполнении работы решались следующие задачи:

- 1. Разработать методологию управления режимом работы ГВУ, в том числе при осуществлении воздухоподготовки, с учетом действия общерудничной естественной тяги (ОЕТ) и инерционности системы проветривания, а также прогнозирования воздухораспределения между шахтными стволами, позволяющие поддерживать подачу воздуха в ПГП в требуемом для обеспечения безопасности ведения работ объеме.
- 2. Установить причины возникновения «воздушных пробок» в воздухоподающих стволах на основании анализа наиболее значимых факторов, влияющих на температурную стратификацию при осуществлении воздухоподготовки в холодное время года.
- 3. Разработать новые технические и технологические решения по осуществлению воздухоподготовки в холодное время года в режиме, обеспечивающем безопасность при оптимизации затрат энергоресурсов.
- 4. Разработать технологические решения по эффективному воздухораспределению между рабочими зонами ПГП, в том числе калийных рудников, для обеспечения безопасных и комфортных условий труда горнорабочих.
- 5. Разработать эффективные способы нормализации условий труда горнорабочих в зависимости от параметров и технологических особенностей ПГП.

Научные положения, выносимые на защиту

- 1. Снабжение воздухом подземного горнодобывающего предприятия в требуемом для обеспечения безопасности ведения горных работ объеме при оптимальных затратах энергоресурсов обеспечивается путем регулирования режимов работы ГВУ, определяемых заранее при помощи корреляционно-регрессионного анализа, позволяющего спрогнозировать изменение воздухораспределения между шахтными стволами в заданном доверительном интервале с учетом инерционности системы проветривания и воздействия на нее случайных факторов, определяемых параметрами наружного воздуха в краткосрочном периоде с точностью 85–90 %.
- 2. Сезонное возникновение в воздухоподающих стволах зон, температура воздуха в которых отличается на 6-8°С, в период воздухоподготовки в холодное время года вызвано инфильтрацией холодного наружного воздуха через надшахтное здание и связано с наличием в стволах армировки, что обусловливает образование в них «воздушных пробок», вызывающих опасность изменения температурного режима в смежных воздухоподающих стволах и обледенения крепи в них.
- 3. Технические и технологические решения, нивелирующие негативное вызванное инфильтрацией наружного воздуха процессе воздухоподготовки, достигается увеличением поверхности теплообмена ШКУ, расположением теплообменников нагревающих элементов периметру надшахтного здания и применением воздушной завесы, а также использованием низкопотенциального тепла дымовых газов с котельной установки для нагрева теплоносителя воздухонагревательных установок, что позволяет обеспечить равномерный прогрев воздуха в воздухоподающих стволах, устранив угрозу нарушения в них теплового режима, и снизить затраты энергетических ресурсов в пределах 11–18 %.
- 4. Преграждение пути движения воздуха из воздухоподающих стволов за счет использования автоматических вентиляционных дверей, расположенных в выработках главных направлений, при возникновении нештатной ситуации

и включение при этом нагнетательных вентиляторов ШКУ в реверсивный режим системой автоматизации позволит существенно снизить время на реверсирование струи воздуха в руднике за счет нейтрализации влияния выработанного пространства, начинающего играть роль источника тяги при реверсе ГВУ, а размещение мобильных быстровозводимых шахтных вентиляционных перемычек, месторасположение которых определяется заранее, в зависимости от возможного места возникновения пожара, исключит возможность попадания дымовых газов в рабочую зону.

5. Возникновение между горными выработками естественных тяг, способствующих движению воздуха в требуемом направлении, а также ограждение горных участков, не предназначенных для проветривания, мобильными быстровозводимыми перемычками позволяет исключить выпадение конденсата в горных выработках неглубоких рудников при снижении затрат электроэнергии на работу системы кондиционирования воздуха (СКВ) до 12 %, обеспечить подачу свежего воздуха в рабочие камеры в требуемом объеме без применения дополнительных источников тяги и снизить температуру воздуха в буровой галерее нефтешахт до требуемой при снижении затрат на проветривание в пределах 17–23 %.

Научная новизна результатов работы

- 1. Разработана и обоснована методика расчета величины и направления общерудничной естественной тяги, позволяющая обеспечивать подачу воздуха в требуемом объеме за счет управления режимами работы ГВУ при минимизации затрат энергоресурсов на проветривание.
- 2. Установлены причины температурной изменчивости воздуха по сечению и глубине воздухоподающих стволов, обусловливающая возникновение в них «воздушных пробок», вызывающих опасность изменения температурного режима в смежных воздухоподающих стволах.
- 3. Разработаны и обоснованы технические и технологические решения, позволяющие обеспечить равномерное распределение тепловых потоков по

глубине и сечению воздухоподающих стволов, устранив проблему возникновения «воздушных пробок» и нерационального использования энергетических ресурсов.

- 4. Разработана и обоснована система проветривания рудника, работающая в автоматизированном режиме, позволяющая обеспечить промышленную безопасность в штатном и аварийном режимах проветривания.
- 5. Установлены зависимости возникновения между горными выработками естественных тяг, способствующих движению воздуха в требуемом направлении без использования дополнительных источников, на основании которых разработаны способы проветривания добычных участков подземных предприятий, позволяющие нормализовать условия труда и безопасность горнорабочих с учетом их действия и применения быстровозводимых перемычек.

Методология и методы исследований: процедуры выявления «ложных» данных с целью исключения их влияния при обработке результатов экспериментов; методы корреляционно-регрессионного анализа, в том числе методы проверки статистических гипотез; оценка значимости отдельных параметров в полученных уравнениях регрессии; методы вычислительной математики для решения прикладных задач, в частности метод конечных элементов.

Достоверность и обоснованность научных результатов подтверждается:

- сходимостью данных, полученных теоретическим путем согласно разработанной методике определения требуемого режима работы ГВУ, с результатами, полученными в ходе экспериментов (максимальное отклонение расчетных от опытных значений составляет 7 %);
- корректным проведением компьютерного моделирования распределения воздушных и тепловых потоков по шахтным стволам и горным выработкам.
- положительными результатами испытаний разработанной шахтной вентиляционной перемычки и соответствием ее характеристик, установленных в ходе компьютерного и математического моделирования, высоким изоляционным свойствам.

Теоретическая значимость работы заключается в системном подходе к управлению технологическими процессами проветривания на уровнях отдельной горной выработки, их совокупности в пределах рабочей зоны горного участка, вентиляционной сети в целом, включая шахтные стволы и поверхностные комплексы ГВУ, созданные на основе компьютерного моделирования, подкрепленные результатами натурных экспериментов:

- на основании корреляционно-регрессионного анализа получены уравнения регрессии, позволяющие определить величину и направление общерудничной естественной тяги с заданной доверительной вероятностью;
- при помощи методов вычислительной математики решить прикладные задачи по распределению тепловых потоков в калориферном канале, в воздухоподающих стволах при работе системы воздухоподготовки и при совместном регулировании режимов работы ГВУ и ШКУ.

Практическая значимость проведенных исследований заключается в следующем:

- 1. Разработанная методика позволяет осуществлять расчет общерудничной естественной тяги на основании данных измерений параметров воздуха только на ГВУ, что исключает необходимость учета временного запаздывания его поступления в воздухоподающие стволы, при изменении режима проветривания, а также позволяет осуществить прогнозирование воздухораспределения между шахтными стволами с учетом инерционности системы проветривания и других случайных факторов и выбрать требуемый режим работы ГВУ для поступления воздуха в необходимом объеме.
- 2. Установлены причины возникновения в воздухоподающих стволах «внутристволовой естественной тяги», часто достигающей величины, при которой воздух в ствол перестает поступать (возникает «воздушная пробка»), и появляется опасность нарушения температурного режима при воздухоподготовке в смежных воздухоподающих стволах.

- 3. Установлено, что при осуществлении воздухоподготовки в холодное время года следует располагать ШКУ в стенах надшахтного здания, либо использовать пластинчатые нагревательные элементы в калориферном канале, либо применять воздушную завесу в воздухоподающем стволе, а также использовать систему для нагрева воды, подаваемой в ШКУ, за счет тепла дымовых газов, для обеспечения равномерности прогрева воздуха по сечению и глубине ствола, что исключает возможность возникновения «воздушных пробок» и способствует снижению энергетических ресурсов, затрачиваемых на процесс нагрева воздуха.
- 4. Показано, что при размещении автоматических вентиляционных дверей для регулирования воздухораспределения в выработках главных направлений и включение нагнетательных вентиляторов ШКУ в реверсивный режим позволяют снизить влияние выработанного пространства на процесс проветривания, уменьшив тем самым время на реверсирование струи воздуха в случае возникновения нештатной ситуации, а изолирование горного участка от попадания в него воздуха и/или дымовых газов (при возникновении пожара) позволяет обеспечить безопасность в аварийном режиме проветривания.
- 5. Для обеспечения эффективности вентиляции и нормализации условий труда горнорабочих предложены новые способы проветривания добычных участков на примере калийных рудников и нефтяных шахт, в которых используются устройства для регулирования воздухораспределения, учитывающие положительное действие возникающих естественных тяг, и разработанная подземно-поверхностная система кондиционирования воздуха.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Работа соответствует паспорту специальности 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность» по следующим пунктам:

- в соответствии с п. 7 разработана шахтная вентиляционная перемычка, позволяющая быстро и надежно изолировать участок шахты (рудника) от проникновения в него дымовых газов, что дает возможность осуществить защиту горнорабочих в случае возникновения пожара;
- в соответствии с п. 8 разработана новая **система кондиционирования воздуха** поверхностно-подземного типа, позволяющая повысить эффективность проветривания неглубоких рудников и снизить (исключить) негативные последствия, связанные с выпадением влаги в горных выработках, возникающие при отсутствии подобной системы;
- в соответствии с п. 11 разработаны научные основы **управления систе- мой проветривания и воздухоподготовки**, позволяющие обеспечить подачу воздуха в требуемом объеме при изменяющихся внешних возмущающих факторах и **при возникновении нештатных ситуаций**;
- в соответствии с п. 12 **разработаны способы** проветривания добычных участков в нефтешахтах, позволяющие **улучшить условия труда горнорабочих**.

Апробация результатов диссертационной работы

Основные научные положения и практические рекомендации диссертационной работы были доложены и получили одобрение на научных, научно-технических и научно-практических конференциях, симпозиумах, форумах. Всероссийского уровня: «Молодежь и наука: начало XXI века» (Красноярск, 2008); «Нефтегазовое и горное дело» (Пермь, 2009–2018); «Системы обеспечения техносферной безопасности» (Таганрог, 2018, 2019). Международного уровня: «Рудник будущего: проекты, технологии, оборудование» (Пермь, 2011, 2012); «Неделя горняка» (Москва, 2011, 2015–2018); «Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений» (Екатеринбург, 2010); «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2011, 2013–2019); «Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности» (Пермь, 2013); «Тинчуринские чтения» (Казань, 2016, 2017); «Актуальные проблемы и

перспективы развития Верхнекамья» (Березники, 2013); «Проблемы обеспечения безопасности в промышленности, строительстве и на транспорте» (Пермь, 2013, 2016); «Горная и нефтяная электромеханика» (Пермь, 2014–2018); «Международный инновационный горный симпозиум» (Кемерово, 2017–2019); «Актуальные проблемы охраны труда и безопасности производства, добычи и использования калийно-магниевых солей», (Пермь, 2018); «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» (Новокузнецк, 2019); «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (Санкт-Петербург, 2018), «Эффективность и безопасность горнодобывающей промышленности» (Челябинск, 2018, 2019); «Уральская Горнопромышленная декада» (Екатеринбург, 2020).

Реализация результатов работы. Основные научные результаты и практические рекомендации на основе предложенных способов проветривания добычных участков применены на калийных рудниках ПАО «Уралкалий», а также при разработке системы проветривания рудника Усольского калийного комбината (МХК «ЕвроХим») и Усть-Яйвинского калийного комбината ПАО «Уралкалий».

На основании полученного патента изготовлен опытный образец шахтной вентиляционной перемычки и произведены ее испытания на калийных рудниках Пермского края. Основные научные результаты используются при выполнении выпускных квалификационных работ на кафедре «Горная электромеханика» ПНИПУ.

Личный вклад автора заключается:

– в разработке методики определения величины и направления общерудничной естественной тяги с заданной доверительной вероятностью и воздействия возмущающих факторов при проветривании и воздухоподготовке, позволяющей осуществить прогнозирование воздухораспределения между шахтными стволами для обеспечения безопасности в нормальном режиме и в случае возникновения нештатной ситуации с учетом инерционности состояния рудничной атмосферы;

- разработке математической модели и конструкции шахтной вентиляционной перемычки нового типа, позволяющей в кратчайший промежуток времени надежно перекрывать участок ПГП;
- разработке конструкций шахтных калориферных установок и способа размещения системы кондиционирования воздуха, позволяющих повысить эффективность и безопасность процесса воздухоподготовки, создать комфортные условия труда горнорабочих в шахтных стволах, горных выработках и в рабочей зоне;
- разработке схем проветривания добычных участков калийных рудников и нефтешахт, позволяющих обеспечить безопасные и комфортные условия труда в рабочих зонах при оптимизации затрат на электроэнергию.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано более 150 научных работ (39 в изданиях ВАК, девять в изданиях Scopus и Web of Science), а также получено 20 патентов на полезную модель и изобретение.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭНЕРГОЗАТРАТНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОВЕТРИВАНИЯ РАЗВЕТВЛЕННОЙ СЕТИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Указом Президента Российской Федерации в 2011 году [1] определены приоритетные направления развития науки, технологий и техники в нашей стране, среди которых обозначены рациональное природопользование, а также энергоэффективность и энергосбережение.

Впоследствие Указом Президента Российской Федерации в 2018 году [2] отдельно выделена проблема обеспечения промышленной безопасности. К основным источникам опасности и причинам повышения аварийности на промышленных объектах в этом документе относят низкое качество проектных и технических решений, применяемых на таких объектах. Одним из принципов государственной политики в области промышленной безопасности является вопрос внедрения ресурсосберегающих безопасных технологий, модернизация производства и обновление основных производственных фондов, а также внедрение научно-технических достижений и передового опыта в целях обеспечения промышленной безопасности [2].

Исходя из этих Указов Президента Российской Федерации, одна из значимых задач — перевооружение производственных объектов новейшими технологиями, обеспечивающими ресурсосбережение и энергоэффективность при превалирующем значении промышленной безопасности.

Горнодобывающая промышленность, являющаяся энергоемкой и требующей для производства значительных объемов энергоресурсов, также нуждается в развитии энерго- и ресурсосберегающих технологиях. Но в первую очередь добыча полезных ископаемых, связанная с риском для жизни и здоровья работников горнодобывающих предприятий, требует обеспечения мер безопасности ведения горных работ. Поэтому каждую новую разработку, установку или способ осуществления технологического процесса в приоритетном порядке необходимо рассматривать с точки зрения безопасности [3].

В связи с этим существует необходимость разработки и реализации способов и мероприятий, способствующих снижению затрат энергоресурсов на производство, не противоречащих при этом правилам безопасности. Еще более приемлемым является разработка и внедрение технологий, направленных на улучшение условий труда и снижение риска для жизни и здоровья горнорабочих при повышении эффективности производства.

1.1. Факторы, влияющие на эффективность работы ГВУ

При добыче полезных ископаемых подземным способом для обеспечения безопасных условий труда горнорабочих необходимо осуществлять проветривание горных выработок. С этой целью на шахтах и рудниках применяются ГВУ, осуществляющие подачу воздуха по шахтным стволам и горным выработкам в рабочие зоны. Объем воздуха, требуемый для обеспечения проветривания подземного горнодобывающего предприятия, зависит от количества добычных участков, числа горнорабочих, находящихся в шахте (руднике), газообильности горных выработок и других обстоятельств. В настоящее время требуемая производительность ГВУ, а значит и количество затрачиваемой на ее работу электроэнергии, определяется в зависимости от этих показателей. При этом практика проветривания показывает, что объемный расход подаваемого в шахту (рудник) воздуха постоянно изменяется, так как на этот процесс действует множество различных обстоятельств: движение подъемных сосудов по стволам, движение самоходного транспорта под землей, изменение режимов работы вентиляторов и эжектирующих установок под землей и т.д. Одним из значимых факторов, оказывающих существенное влияние на процесс проветривания подземных горнодобывающих предприятий, является общерудничная (общешахтная) естественная тяга, возникающая между шахтными стволами. Если направление общерудничной естественной тяги совпадает с заданным (необходимым) направлением движения воздуха в руднике, ее принято называть положительной общерудничной (общешахтной) естественной тягой. Если общерудничная естественная тяга направлена навстречу движению потока воздуха, то она препятствует заданному режиму проветривания, и в этом случае ее принято называть отрицательной общерудничной (общешахтной) естественной тягой [4–11]. Иногда естественную тягу называют тепловой депрессией [9, 12, 13].

1.1.1. Влияние общерудничной (общешахтной) естественной тяги на процесс проветривания подземного горнодобывающего предприятия

Проблемам возникновения общерудничной (общешахтной) естественной тяги и ее влияния на процесс проветривания посвящено достаточно большое количество работ различных авторов. Впервые на необходимость учета естественной тяги указал еще М.В. Ломоносов [14]. Первые расчетные математические зависимости для определения абсолютного значения естественной тяги, возникающей в горных выработках, по-видимому, были предложены в работах [15-17]. При этом авторами учтены состояние атмосферы в шахте (руднике), которое в расчетах предполагалось политропическим, однородным, изотермическим и адиабатным, а также глубина шахты и развиваемое ГВУ давление. В работах [18, 19] были предприняты попытки учесть влияние естественной тяги на воздухораспределение в вентиляционной сети. Авторы более поздних работ, анализируя влияние различных факторов на величину естественной тяги, предлагали как более универсальные, так и упрощенные расчетные формулы. К примеру, авторы работ [20–22] указывают на независимость естественной тяги от глубины шахты и работы ГВУ. В работе [23] выдвинуто мнение, что в руднике с одноуровневыми стволами естественная тяга инициируется в первую очередь принудительной подачей воздуха, т.е. с помощью так называемого автором «разгона» струи. В работах [24, 25] высказано мнение, что естественная тяга возрастает с увеличением глубины стволов ввиду повышения температуры воздуха и становится тем больше, чем глубже шахта (рудник).

В работе [11] приведены результаты исследования изменения величины естественной тяги в зависимости от концентрации выделяющегося в процессе добычи полезного ископаемого из горных пород газа, влияющего на плотность воздушной среды в подземном пространстве. Авторами сделан вывод, что механизм возникновения естественной тяги между подземными горными выработками для газоносных и негазоносных шахт будет отличаться. Соответствующее явление авторы назвали «давлением газовой вентиляции». Получены математические зависимости влияния разности плотностей «чистого» воздуха и воздуха, насыщенного выделяющимся газом, на величину естественной тяги. При этом исследования выполнены для случая застоя воздушного потока в шахте, когда изменение давления (следовательно, плотности) воздуха происходит только за счет изменения концентрации, т.е. при постоянной температуре воздуха. Следовательно, можно считать, что в настоящей работе доказан факт изменения величины естественной тяги при выделении из горных пород газов другой плотности (например метана). По понятным причинам указанный фактор присущ только газоносным шахтам и рудникам.

Можно заметить, что авторы единодушны в том, что на величину естественной тяги влияют два фактора — плотность воздуха и перепад между высотными отметками сообщающихся выработок. При этом очевидно, что на изменение плотности воздуха и, следовательно, на величину естественных сил, вызывающих перемещение воздушных потоков (масс), влияют следующие причины:

- 1. Изменение плотности воздуха вследствие изменения концентрации газа в выработках.
- 2. Изменение плотности воздуха вследствие колебаний его температуры. В этом случае возникающую естественную тягу логично называть «тепловой депрессией».

Необходимо отметить, что между сообщающимися выработками, высотные отметки которых не меняются относительно друг друга (например шахтные стволы), на величину возникающей естественной тяги будет оказывать влияние только величина плотности воздуха в этих выработках.

Однако на изменение плотности воздуха в горных выработках могут влиять следующие обстоятельства. Возникновение зон с повышенным или пониженным давлением, которые появляются из-за множества причин, таких как: лобовое столкновение воздушных потоков, перераспределение при реверсе ГВУ или изменении ее производительности, при набегании потока воздуха на искусственные препятствия (на шахтные вентиляционные перемычки, вентиляционные двери и т.д.), т.е. вследствие изменения перепада давлений в определенной выработке, участке, точке.

Таким образом, можно констатировать, что в настоящее время отсутствует общепринятая точка зрения на механизм возникновения общерудничной естественной тяги, в том числе на факторы, влияющие на ее величину и направление.

Отсутствие научного обоснования причин возникновения и закономерностей изменения общерудничной естественной тяги, а также механизм ее влияния на работу ГВУ делает невозможным создание методологии управления процессом проветривания подземных горных выработок с учетом действия тяги.

С целью определения влияния общерудничной естественной тяги на процесс проветривания подземных горнодобывающих предприятий необходимо исследовать зависимость ее величины и направления от указанных выше параметров в отдельности.

В связи с тем что определить влияние атмосферных условий на величину плотности поступающего в шахтные стволы воздуха (т.е. и на значение общерудничной естественной тяги) отдельно проблематично, необходимо на действующей шахте (руднике) разработать и провести такие эксперименты, которые позволят это сделать.

Определить характер изменения давления воздуха на его плотность при относительно постоянном значении температуры можно в процессе изменения скорости вращения рабочего колеса ГВУ. Изменять режим работы ГВУ необходимо постепенно, но за относительно короткий промежуток времени, в течение которого температура подаваемого в шахтные стволы воздуха изменится незначительно.

Определить характер влияния изменения температуры воздуха на его плотность при неизменном давлении можно путем регулирования режима работы системы воздухоподготовки, т.е. с помощью шахтных калориферных установок или системы кондиционирования воздуха.

В связи с тем что эксперимент с регулированием теплопроизводительности системы воздухоподготовки связан с опасностью нарушения температурного режима в стволах и технологического процесса проветривания, выполнить исследования можно другим способом.

На одном и том же руднике необходимо провести испытания в различное время года, при этом изменяя скорость вращения рабочего колеса ГВУ на одних и тех же частотах за один и тот же интервал. Тогда и давление, развиваемое ГВУ, в обоих экспериментах будет изменяться аналогичным образом, а температура воздуха будет различной. Различие атмосферного давления в этом случае играть роли практически не будет, так как оно в обоих случаях считается неизменным.

В настоящей работе принято решение провести эксперимент на калийном руднике, обладающем согласно [9] малым аэродинамическим сопротивлением подземной части, в котором 85 % общерудничной депрессии теряется в шахтных стволах, а также в главных воздухоподающих и вентиляционных выработках. Поэтому при проведении экспериментов зимой и летом в течение одного года можно считать, что аэродинамическое сопротивление рудника существенно не изменится.

Определить характер изменения общерудничной естественной тяги при естественном изменении плотности воздуха, т.е. без воздействия на этот процесс внешних факторов, а только природного изменения климата, можно во время отключения ГВУ.

Таким образом, для исследования влияния вышеуказанных факторов на значение плотности воздуха, а следовательно, и на значение величины и направления общерудничной естественной тяги, необходимо проведение экспериментов на реальных подземных горнодобывающих предприятиях как при отключении ГВУ, так и при различных режимах ее работы.

1.1.2. Зависимость режимов управления процессом проветривания от внешних факторов

Помимо общерудничной естественной тяги, на процесс проветривания оказывают влияние и другие внешние возмущающие факторы, воздействие которых предсказать практически невозможно, поэтому их необходимо считать случайными. К этим факторам относятся:

- 1. Изменение воздухораспределения между горными выработками при движении по ним самоходного транспорта [9, 26]. Подробно этот процесс рассмотрен в работах для метрополитена [27–32], в которых выведены основные закономерности и математические зависимости для определения степени влияния на движение воздуха в тоннеле и на работу вентилятора.
- 2. Инерционность процесса проветривания, вызванная большой протяженностью горных выработок и значительным объемом выработанного пространства [33–53], а также работой подземных вентиляторов и биением их рабочих колес [54–64].
 - 3. Выделение газа в горные выработки [65–77].

Для управления проветриванием с учетом каждого из этих факторов в настоящее время предлагаются автоматизированные системы регулирования режимов работы ГВУ, например, описанные в работах [78–90]. Однако в существующих и предлагаемых системах управления предполагается, что полученная информация с измерительных устройств и датчиков является истинной, и ей можно доверять полностью. Но по показаниям с датчиков расхода воздуха видно, что значения изменяются довольно в широком диапазоне, причем нередко скачкообразным образом. Это касается и других контролируемых физических величин. За истинное при этом принимается среднее значение, взятое за интервал времени. Подобный способ обработки полученной информации может внести существенные погрешности при управлении системой проветривания.

Кроме того, существующие системы управления процессом проветривания предполагают свое функционирование в режиме реального времени.

В этом случае, при управлении ГВУ и остальными вентиляционными устройствами не будет учитываться инерционность процесса воздухораспределения между горными выработками.

Таким образом, помимо существенного влияния общерудничной естественной тяги, на процесс проветривания действуют случайные факторы. Для эффективного управления процессом проветривания необходимо разработать алгоритм регулирования режимов работы ГВУ с учетом их влияния.

1.2. Оценка эффективности и безопасности технологий воздухоподготовки

Проветривание подземных горнодобывающих предприятий осуществляется круглогодично, поэтому при разработке способов управления этим процессом необходимо учитывать не только изменение естественных процессов в природе за короткий период времени, но и сезонное изменение параметров наружного воздуха.

Согласно [91] температура воздуха, подаваемого в шахтные воздухоподающие стволы, должна быть не ниже +2 °C. Поэтому подаваемый в шахту (рудник) воздух в холодное время года нагревают в шахтных калориферных установках (ШКУ).

В ходе проведения воздушно-депрессионных съемок [92, 93] было установлено, что температура воздуха в воздухоподающих стволах в период проведения экспериментов составляла 24–28 °C, т.е. выше требуемой в 12–14 раз.

В этом случае наблюдается не только значительный перерасход энергоресурсов, расходуемых на нагрев воздуха в ШКУ, но и отрицательное влияние общерудничной естественной тяги на процесс проветривания. Последнее связано с тем, что более теплый воздух является более легким, т.е. стремится подняться вверх. Следовательно, при закачке в воздухоподающие стволы нагретого до высоких температур легкого воздуха, возникает противодействующая работе ГВУ тяга [13].

Основная причина, по которой воздух нагревают до температуры значительно выше, чем требуется, заключается в следующем. Существующий способ воздухоподготовки предполагает подачу нагретого воздуха в воздухоподающий ствол по отдельному калориферному каналу (рисунок 1.1, a). Помимо нагретого в ШКУ воздуха, за счет общешахтной депрессии в воздухоподающий ствол подсасывается холодный наружный воздух через надшахтное здание. ШКУ должна обеспечить такой режим работы, при котором в стволе будет поддерживаться температура не ниже +2 °C после смешивания холодного и нагретого потоков воздуха. Однако обеспечить процесс равномерного прогрева воздуха по всему сечению ствола при существующем способе воздухоподготовки практически невозможно. Связано это с тем, что воздухоподающий ствол армирован, в результате чего он разделяется на участки с различными сечениями. В этом случае скорости, а следовательно, и объемный расход в каждом из сечений будут различными, т.е. и нагрев воздуха в них будет производиться неравномерно (рисунок $1.1, \delta$).

Для того чтобы исключить наличие в воздухоподающих стволах зон с температурой ниже +2 °C, воздух в ШКУ нагревают до существенно больших значений, в результате чего и в самих стволах его температура гораздо выше.

По понятным причинам на подземных горнодобывающих предприятиях стремятся снизить затраты энергоресурсов при воздухоподготовке. Но в существующей системе это может привести к образованию зон в воздухоподающем стволе с низкой температурой, а следовательно, к аварийной ситуации. Поэтому в этой области необходимо рассматривать все разрабатываемые способы с точки зрения безопасности.

Количество теплообменников в ШКУ, их рабочая теплопроизводительность и режим работы нагнетательных вентиляторов выбираются для температуры воздуха наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92 [94].

Для регулирования теплопроизводительности ШКУ можно воспользоваться следующими известными способами:

1. Изменение режима работы (развиваемое статическое давление и производительность) нагнетательных вентиляторов ШКУ.

- 2. Изменение расхода теплоносителя (для водяных ШКУ) или тепловой мощности используемых в ШКУ горелок (для газовых ШКУ).
 - 3. Изменение температуры прямой и обратной воды (для водяных ШКУ).
- 4. Согласованное изменение режима работы нагнетательных вентиляторов и расхода теплоносителя (тепловую мощность горелок для газовых ШКУ).

При регулировании процесса воздухоподготовки только за счет изменения режима работы нагнетательных вентиляторов проблема смешивания холодного и нагретого в ШКУ воздуха усугубляется. Связано это с тем, что при снижении предельного уровня производительности нагнетательных вентиляторов ШКУ может возникнуть ситуация, при которой весь нагретый воздух начнет перемещаться по стороне воздухоподающего ствола, расположенной под калориферным каналом, а с противоположной стороны будет перемещаться холодный наружный воздух.

В результате этого может нарушаться герметизация межтюбинговых уплотнений [95].

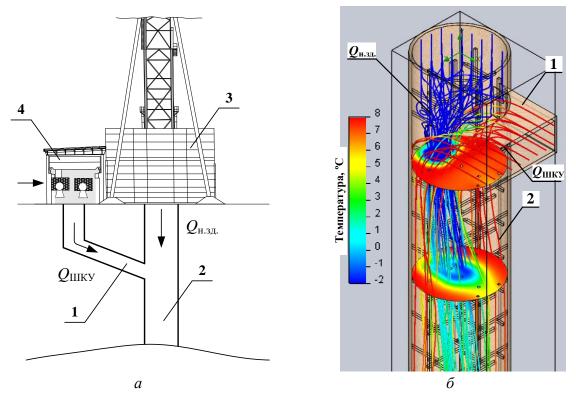


Рисунок 1.1 — Процесс смешивания холодного и нагретого в ШКУ потоков воздуха: a — поверхностный комплекс ШКУ (общий вид); δ — результат моделирования; l — калориферный канал; 2 — воздухоподающий ствол; d — надшахтное здание; d — калориферная установка

Регулирование теплопроизводительности водяных ШКУ только за счет изменения расхода теплоносителя также не решает проблему, так как при низкой скорости движения теплоносителя появляется угроза «заморозки» трубок теплообменников. При высокой скорости движения нагретой воды в теплообменнике на выходе из ШКУ воздух будет иметь температуру, значение которой будет существенно выше требуемого.

Третий вариант связан с необходимостью поддержания температуры обратной воды на отметке ниже 70 °C [96]. В противном КПД котла в котельной установке, с которой осуществляется подача теплоносителя, будет снижаться, а следовательно, снизится эффективность и увеличатся финансовые затраты всего процесса воздухоподготовки.

Из предложенных единственным эффективным вариантом управления работ существующих способов воздухоподготовки является совместное регулирование режимов работы нагнетательных вентиляторов и расхода теплоносителя. Однако подобный вариант не способен полностью обеспечить равномерность прогрева воздуха по сечению ствола. Поэтому для повышения эффективности и безопасности необходимо разработать принципиально новые способы воздухоподготовки.

Для того чтобы при подаче нагретого в ШКУ воздуха в ствол не требовалось регулировать процесс «смешиваемости», в работах [97, 98] было предложено избавиться от нагнетательных вентиляторов и изолировать копер. В этом способе предполагалось, что весь воздух за счет общешахтной депрессии будет проходить через ШКУ. При подобном способе воздухоподготовки, вследствие невозможности регулирования скорости потока воздуха через теплообменники, существует опасность заморозки ШКУ. Кроме того, инфильтрация (подсос) воздуха через надшахтное здание полностью исключить невозможно, и в ствол в любом случае будет поступать холодный наружный воздух. Ввиду того, что в безвентиляторных ШКУ воздух естественным образом стремится проходить через присутствующие технологические проемы, в которых могу быть установлены теплообменники, подобный вариант воздухоподготовки

способен устранить проблему неравномерного прогрева воздуха по сечению ствола. Но в этом случае требуется разработка нового типа безвентиляторной ШКУ.

Таким образом, необходимо разработать новые способы воздухоподготовки и систему управления работой ШКУ, обеспечивающие эффективность и безопасность проветривания подземного горнодобывающего предприятия в холодное время года.

1.3. Способы управления воздухораспределением между горными выработками подземных горнодобывающих предприятий

Подача в шахту (рудник) воздуха в требуемом объеме не гарантирует того, что все рабочие зоны будут проветриваться в штатном режиме, ввиду больших объемов выработанного пространства, разветвленности горных выработок и т.д.

Существуют два способа регулирования воздухораспределения: положительный и отрицательный [5, 15, 16].

Суть регулирования воздухораспределения при положительном способе заключается в обеспечении подачи воздуха в рабочие участки за счет дополнительных источников тяги. Этими источниками тяги являются вентиляторы местного проветривания (ВМП) и передвижные подземные вспомогательные вентиляторные установки (ПВВУ).

В работах [99–107] рассматриваются различные способы использования ВМП и ППВУ. При использовании одной или нескольких ВМП и ППВУ в выработках они начинают играть роль пневматического поршня, значительно увеличивая объем воздуха, подаваемого в проветриваемую часть шахты (рудника).

Однако проведенный в исследованиях [108–110] анализ показал, что подобный способ управления воздухораспределением является затратным с точки зрения дополнительного потребления электроэнергии вентиляторами.

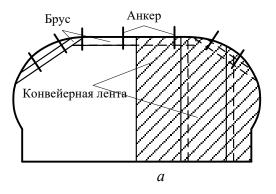
Кроме того, управлять режимами работы ВМП и ППВУ при динамически изменяющемся процессе проветривания и без учета его инерционности достаточно сложно. Также должны меняться режимы их работы по мере отработки шахтного поля, а также их место расположения при движении фронта очистных работ. В первом случае необходимы устройства для регулирования производительности вентиляторов, в основном частотные электроприводы, которые во взрывозащищенном исполнении стоят в разы больше обычных. Во втором — вслед за передвижением вентиляторных установок необходимо будет перемещать систему их электроснабжения, что достаточно трудо- и финансово затратно.

Использование положительного способа управления воздухораспределением в угольных шахтах, опасных по метану, в принципе невозможно ввиду ограничений действующей нормативной документации [52]. В шахтах такого типа использование подземных вентиляторов ограничено только проветриванием проходческих забоев.

Вторым, наиболее рациональным в рассматриваемом контексте, является отрицательный способ регулирования, когда участки, не предназначенные для проветривания, ограждаются от поступления в них свежего воздуха. Выполняется это при помощи шахтных вентиляционных перемычек (ШВП), которые на подземных горнодобывающих предприятиях делятся на два вида: стационарные, возводимые на долгий период, и переносные.

К стационарным относятся перемычки, изготовленные из отработанной конвейерной ленты. На участках, где необходимо увеличить аэродинамическое сопротивление, подвешиваются полосы лент, которые частично (рисунок 1.2, a) или полностью (рисунок 1.2, b) перекрывают сечение горной выработки.

За счет использования перемычек данного типа можно регулировать воздухораспределение между добычными участками и сохранить при этом возможность прохода (проезда) через них горнорабочих. Однако при возникновении пожара эти перемычки не способны будут предотвращать прохождение через них дымовых газов в рабочую зону.



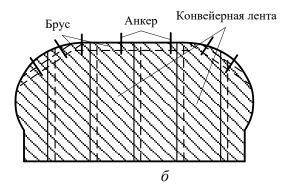


Рисунок 1.2 – Гибкая вентиляционная перемычка: a – частично перекрывающая сечение; δ – полностью перекрывающая сечение

К стационарным и широко применяемым в настоящее время изолирующим устройствам относятся в основном автоматические вентиляционные двери (АВД), конструкции некоторых из них представлены на рисунке 1.3.

Для защиты горнорабочих от отравления дымовыми газами при пожаре, а также изолирования участка, в котором произошло возгорание (ограничить доступ в очаг возгорания свежего воздуха), бойцами военизированной горноспасательной части (ВГСЧ) используются переносные ШВП. По понятным причинам к перемычкам такого типа предъявляются требования по скорости возведения и надежности изолирования участка в руднике (шахте).

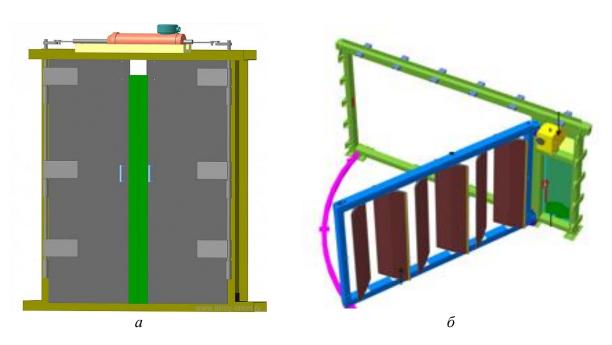


Рисунок 1.3 — Варианты автоматических вентиляционных дверей: a — состоящая из двух дверей; δ — дверь с поворотными жалюзийными регуляторами

В шахтах и рудниках, где помимо пожара существует угроза взрыва, используют ШВП, замедляющие скорость воздушного потока, так называемые «парусные перемычки» (типа «Парус»). Перемычки данного типа (рисунок 1.4) эффективны для гашения взрывной волны, но не позволяют изолировать участок горной выработки от прохождения через него воздуха и/или дымовых газов [111].

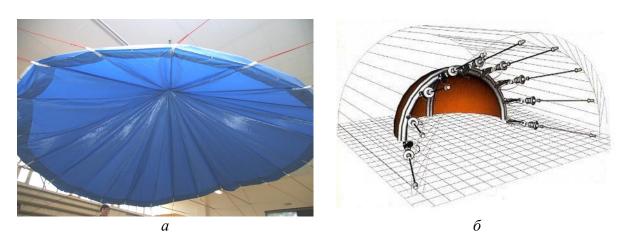


Рисунок 1.4 — Шахтная вентиляционная перемычка типа «Парус»: a — внешний вид; δ — имитационная модель принципа действия

Надежно изолировать горную выработку от проникновения в нее воздуха или дымовых газов можно при помощи воздушных перемычек (рисунок 1.5) [112, 113]. Основное достоинство воздушных ШВП заключается в том, что после возведения она принимает форму выработки и позволяет сглаживать все ее неровности, выпуклости и изгибы. Но при этом у перемычек подобного типа есть два существенных недостатка: значительный объем воздуха (до 2000 л), требуемого для накачки, и время на возведение (до 1,5 часа). Кроме того, для получения такого объема воздуха требуется источник электроэнергии, которые присутствуют в шахте (руднике) только в определенных участках. Иногда бойцы ВГСЧ используют для накачки воздушной ШВП компрессор, работающий на дизельном топливе. Но и в этом случае возникает проблема, связанная с тем, что применять его можно не во всех участках. Кроме того, для перемещения перемычки и компрессора из-за их большого веса и габаритов требуется группа из бойцов ВГСЧ в количестве 3–4 человек.



Рисунок 1.5 — Воздушная шахтная вентиляционная перемычка: a — внешний вид (отечественная); δ — этапы возведения перемычки (зарубежная)

Универсальных ШВП в настоящее время не существует. Стационарные перемычки, например, приведенные выше АВД, могут эффективно применяться для регулирования воздухораспределения, но при этом у них есть как минимум два недостатка:

- 1. С течением времени АВД будут подвергаться действию горного давления, в результате чего их исполнительные механизмы поворотные жалюзийные регуляторы (рисунок 1.3, δ) деформируются и не смогут надежно перекрывать путь движения воздуху и при возникновении пожара дымовым газам.
- 2. АВД устанавливаются только в определенном месте, т.е. из-за невозможности их перемещения в требуемую точку они теряют свою универсальность.

Из передвижных существующих в настоящее время типов ШВП наиболее эффективной является воздушная. В связи с этим необходимо использовать ее положительные свойства и избавится от основного недостатка — существенных временных затрат.

1.4. Анализ систем проветривания при возникновении нештатных ситуаций

Рост производства в Российской Федерации в области горной промышленности неизбежно связан с наращиванием темпов добычи полезного иско-

паемого, а также увеличением одновременно задействованных в работе добычных комплексов и персонала. Все это в условиях попытки оптимизации и сохранения финансовых затрат при осуществлении технологических процессов ведет к росту возникающих аварий на предприятиях [114–121]. При этом смертельная тяжесть промышленных аварий в России и за рубежом не снижается и остается на высоком уровне: в 1980-х годах 1000 погибших ежегодно, в 1990-х — 1100 погибших, в 2000-х годах эта цифра уже 1500 погибших, и в период 2010–2015 годов уровень порядка 1000 человек в год [122–124].

В связи с этим разработанные и применяемые в настоящее время способы обеспечения безопасности требуют серьезной доработки, а введение новых систем оптимизации производства и энергосбережения при осуществлении технологических процессов — анализа их эффективности в случае возникновения нештатных ситуаций и аварий.

1.4.1. Системы управления процессом подачи и распределения воздуха при возникновении нештатной ситуации

К настоящему времени созданы разнообразные методики расчета и программные комплексы, позволяющие определить пути движения воздуха в нормальном и аварийном режимах [39, 124–130], в том числе методы расчета, учитывающие влияние выработанных пространств [9, 131], газовыделения из вмещающих пород [132–136] и др. Разработаны средства и мероприятия по защите горнорабочих [137–139].

Анализ, проведенный в работе [122], показал, что повсеместное применение компьютерных программ для расчёта вентиляции стало причиной того, что при проектировании и на предприятиях перестали составлять аэродинамические схемы, а инженерно-технические работники под понятием «аэродинамическая схема» стали понимать схемы вентиляции, объединенные с планом ликвидации аварий. Также установлено, что появляются новые проблемы, связанные с достоверностью аэродинамических характеристик выработок, анали-

зом динамики газового баланса, качества шахтной вентиляционной сети и эффективности проветривания. На основе данных, полученных в этих программах, даются рекомендации по безопасности ведения горных работ, в том числе при возникновении пожара.

При этом достаточно редко встречаются исследования, направленные на создание автоматизированных систем обеспечения безопасности в горных выработках в случае возникновения пожара и в других острых нештатных ситуациях, требующих незамедлительного оперативного вмешательства.

В работе [140] представлен «Электронный план ликвидации аварий» (ЭПЛА), в котором рассмотрены возможные пути распространения дымовых газов в случае возникновения пожара в подземном пространстве конкретного горнодобывающего предприятия. Однако помимо анализа последствий пожара и плана их ликвидации, необходимо разрабатывать мероприятия, которые позволят быстро предпринимать действия по локализации опасной ситуации и предупреждению ее развития.

Для всасывающих способов проветривания, применяемых на большинстве рудников и шахт в мире, существует проблема влияния выработанного пространства при осуществлении реверсирования струи воздуха, необходимость которой предписывается правилами [91]. Связано это с тем, что при реверсе ГВУ выработанное пространство начинает играть роль источника тяги [9, 141, 35]. В этом случае воздух в шахту (рудник) поступает и со стороны вентиляционного ствола и со стороны воздухоподающих стволов, т.е. не происходит реверса струи воздуха. Причем этот процесс может продолжаться от 40 минут до 2 часов [9, 35], и только после этого направление движения воздуха в руднике реверсируется.

Ввиду того что существующие изолирующие устройства не являются абсолютно герметичными, через них, хотя бы в небольшом количестве, наблюдается проход воздуха. При большом количестве изолирующих устройств суммарная потеря или притока воздуха через может достигать 20–25 % [9]. Поэтому при расчете вентиляционных сетей в период реверса ГВУ необходимо учитывать влияние выработанного пространства [142].

Исходя из того, что исключить влияние выработанного пространства невозможно, требуется разработка способов противодействия их негативного влияния и использования положительного. В существующих системах проветривания этого не происходит.

Кроме того, на шахтах и рудниках повсеместно начинают внедрять автоматизированные системы проветривания, использующие рециркуляцию (частичное повторное использование) воздуха. Связано это в основном с тем, что, помимо снижения затрат электроэнергии на работу ГВУ, можно снизить затраты энергоресурсов на воздухоподготовку в холодное и теплое времена года [143, 144].

Само по себе частичное повторное использование воздуха начали применять еще в 30-х годах XX века на угольных шахтах Англии [145]. После этого началось развитие указанной системы для нагрева поступающего в рудник воздуха [146], охлаждения его в глубоких шахтах [147], а также для удаленного проветривания добычных участков [148].

В 70–80-х годах XX века с целью повышения эффективности, экономичности и безопасности ведения горных работ было предложено использовать рециркуляционное проветривание тупиковых выработок [149, 150], а также применять исходящий из шахты (рудника) воздух повторно, подавая часть его на свежую струю [151–153].

В современных работах [81, 82, 154, 155] предложено требуемый максимально допустимый коэффициент рециркуляции $K_{\rm peq}^{max}$ поддерживать в автоматизированном режиме за счет управления режимами работы (скоростью вращения рабочего колеса) рециркулирующего вентилятора ($\omega_{\rm peq}$). Этот процесс зависит от текущего значения коэффициента рециркуляции ($K_{\rm peq}$):

$$\frac{d \omega_{\text{peu}}}{dt} = a \left(K_{\text{peu}}^{max} - K_{\text{peu}}(t) \right) + b \int \left(K_{\text{peu}}^{max} - K_{\text{peu}}(t) \right) dt, \tag{1.1}$$

где a и b – весовые коэффициенты уравнения.

Совместно с рециркулирующим вентилятором в работе [81] предложено применять управляемые в автоматизированном режиме АВД, расположенные в главных вентиляционных выработках. При их совместной (согласованной) работе достигается поддержание требуемого энеросберегающего режима проветривания в режиме рециркуляции.

С точки зрения снижения затрат электроэнергии эффективность подобного способа не вызывает сомнений. Однако наличие АВД на пути основного источника, осуществляющего подачу свежего воздуха в шахту (рудник), – ГВУ – создает опасность для жизни и здоровья горнорабочих. В связи с этим с точки зрения безопасности ведения горных работ вопрос использования предложенных систем рециркуляции не изучен.

При этом следует учитывать, что подобный способ проветривания может применяться не во всех шахтах.

1.4.2. Способы защиты горнорабочих при возникновении пожара в подземном горнодобывающем предприятии

Возникновение пожара в горных выработках рудников и шахт является одной из самых опасных аварий на подземных горнодобывающих предприятиях. От места возникновения возгорания и интенсивности пожара зависит направление движения дымовых газов и воздухораспределение между горными выработками в целом. В связи с тем что мест, в которых может возникнуть пожар, достаточно много и при условии, что вентиляционная обстановка в добычных участках постоянно изменяется (по мере отработки шахтного поля), точно спрогнозировать возможные пути движения дымовых газов и их концентрацию во всей шахте (руднике) практически невозможно.

В шахтах и рудниках могут возникать локальные возгорания, например, в добычных участках, при которых невозможно будет обеспечить безопасность ведения горных работ при реверсировании потока воздуха в шахте, даже если оно будет произведено в кратчайший период [156].

Например, в 1980 году на руднике БКПРУ-3 (г. Березники) после возникновения пожара в конвейерном штреке, вследствие попадания дымовых газов в рабочую зону погибло 5 горнорабочих. От начала аварии до трагических последствий прошло нескольким больше 15 минут, т.е. даже при осуществлении реверса струи воздуха не удалось бы избежать гибели горнорабочих.

Согласно исследованиям, проведенным в работе [13], дымовые газы попали в рабочую зону вследствие действия возникшей естественной тяги, названной в работе тепловой депрессией. В результате того, что в процессе пожара в конвейерном штреке увеличилась температура, более легкие дымовые газы поднялись вверх против требуемого направления движения воздуха, после чего попали в рабочую зону. В исследованиях [13, 157–162] на примере добычных участков в калийных рудниках установлено, что подобная ситуация возможна из-за особенностей технологии их подготовки, отработки и проветривания. Связано это с тем, что разработанные схемы подачи воздуха в добычные участки калийных рудников выполнены без учета влияния естественных тяг как в нормальном, так и в аварийном режимах проветривания.

Вследствие того, что температура воздуха в конвейерном штреке, всегда выше, чем в выемочных штреках, между выемочными (транспортными) штреками (пласты Красный-2 и АБ) и заглубленным конвейерным штреком будут возникать естественные тяги ($h_{\rm el}$), величина которых также зависит от перепада высотных отметок между началом и концом панели и/или блока (рисунок 1.6).

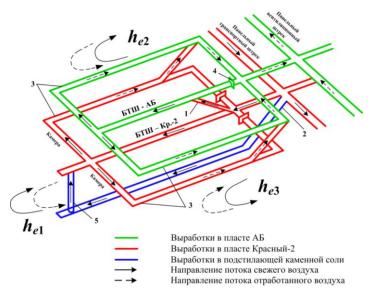


Рисунок 1.6 – Схема возникновения естественной тяги в блоке калийного рудника

Кроме естественной тяги, возникающей между конвейерным и выемочными (транспортными) штреками, в добычном участке будут действовать естественные тяги между выемочным (транспортным) штреком и вентиляционными штреками в каждом из пластов ($h_{\rm e2}$ и $h_{\rm e3}$) (см. рисунок 1.6).

Естественные тяги h_{e1} , h_{e2} , h_{e3} будут способствовать проветриванию только в случае расположения добычного участка по восстанию пласта, так как они будут направлены согласно требуемому направлению движения воздуха. Направление этих положительных естественных тяг показано сплошными линиями (см. рисунок 1.6). Когда добычной участок расположен по падению пласта естественные тяги h_{e1} , h_{e2} , h_{e3} начинают противодействовать движению воздуха, т.е. направляются встречно (пунктирные линии на рисунок 1.6).

Для решения проблемы отрицательного действия на процесс проветривания естественных тяг в работе [13] предложено изменить схему подготовки, отработки и проветривания добычного участка, расположенного по падению пласта, с учетом их действия следующим образом:

1. Изменить назначение блокового конвейерного штрека. По нему предложено отработанный воздух выдавать в панельный вентиляционный штрек.

В этом случае естественные тяги $h_{\rm el}$ и $h'_{\rm el}$, возникающие между выемочными (транспортными) штреками в пластах Красный-2 и АБ, будут направлены согласно требуемому направлению движения воздуха, т.е. будут способствовать вентиляции панели (блока) (рисунок 1.7).

2. Формировать вентиляционные штреки путем сбойки камер друг с другом в конце их проходки. В этом случае требование по наличию вентиляционного штрека соблюдается, но изменяется способ его проходки, т.е. его проходят не на этапе подготовки блока, а сбивая при первом ходе комбайна камеры между собой (рисунок 1.8).

В этом случае на границе блока будет формироваться выработка – вентиляционный штрек.

В работе [13] высказано мнение, что при подобной схеме естественные тяги $h_{\rm e2}$ и $h_{\rm e3}$ направят струю свежего воздуха в рабочие камеры (рисунок 1.8).

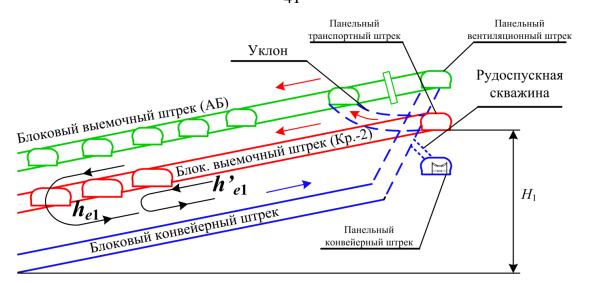


Рисунок 1.7 – Воздухораспределение в описываемой схеме проветривания добычного участка (разрез по выемочному и заглубленному конвейерному штрекам)

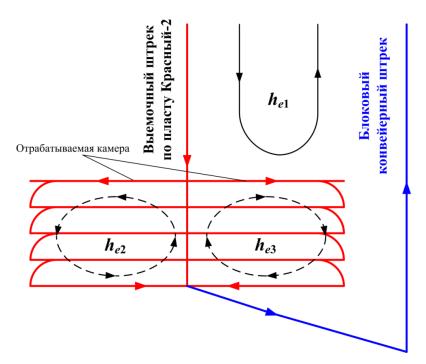
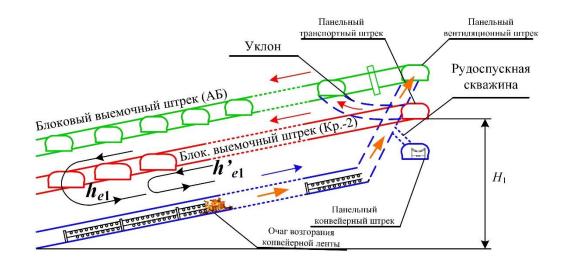


Рисунок 1.8 – Действие естественных тяг в описываемой схеме подготовки и отработки блока (пласт Красный-2)

В исследованиях, проведенных в работе [163], установлено, что при подобной схеме проветривания в случае возникновения пожара в конвейерном штреке все дымовые газы за счет действия естественной тяги $h_{\rm e1}$ будут удалятся в вентиляционный штрек, минуя рабочую зону (рисунок 1.9).

Однако в этих исследованиях также было установлено, что в панелях и блоках, расположенных по восстанию пласта, в случае возникновения пожара

в конвейерном штреке дымовые газы начнут поступать в рабочие камеры, как показано на рисунок 1.10.



─ Направление потока дымовых газов Рисунок 1.9 – Распространение дымовых газов в блоке, расположенном по падению пласта (предлагаемая схема)

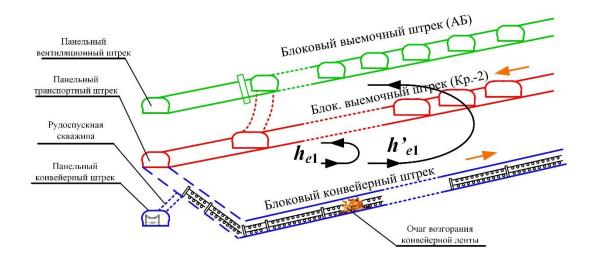


Рисунок 1.10 — Распространение дымовых газов в блоке, расположенном по восстанию пласта (предлагаемая схема)

– Направление потока дымовых газов

Кроме того, в работе [164] было установлено, что и в панелях (блоках), отрабатываемых по предложенному способу, возникает следующая проблема.

На начальном этапе отработки выемочного участка (при малом количестве отработанных камер) естественные тяги $h_{\rm e2}$ и $h_{\rm e3}$ (рисунок 1.8) будут малы по своей величине и не смогут направить воздух в рабочие камеры. В этом случае воздух из выемочного (транспортного) штрека, минуя камеры, будет проходить в конвейерный штрек. Обратная картина наблюдается на конечном этапе отработки — естественные тяги $h_{\rm e2}$ и $h_{\rm e3}$ достигнут величины, при которой часть отработанного (загрязненного) воздуха начнет рециркулировать в отрабатываемые камеры.

Таким образом, существующие и предлагаемые способы проветривания добычных участков, рассмотренных на примере калийных рудников, не позволяют в полной мере обеспечить эффективность вентиляции добычных участков и соблюсти при этом требования правил безопасности при возникновении пожара. В связи с этим требуется разработка новых способов проветривания, позволяющих выполнить оба этих условия.

1.5. Оценка эффективности обеспечения требуемых условий труда горнорабочих в добычных участках при повышенном значении температуры воздуха в них

На глубоких шахтах и рудниках из-за высокой температуры окружающего породного массива и снижения количества вскрывающих горных выработок в рабочей зоне формируются неблагоприятные климатические условия [165–170].

Для подземных горнодобывающих предприятий температура воздуха в действующих выработках не должна превышать +26 °C [171]. На большинстве глубоких рудников и шахт эта температура гораздо выше.

Кроме того, существуют уникальные месторождения, на которых в процессе добычи полезного ископаемого возникают условия, когда в добычных участках превышаются параметры воздуха выше значений, установленных правилами безопасности [171]. Например, в нашей стране для добычи высоковязкой нефти на Ярегском нефтетитановом месторождении (ООО «ЛУКОЙЛ-

Коми») применяется уникальный термошахтный способ, при котором в продуктивный пласт закачивается перегретый пар [172, 173]. За счет пористости пласта происходит равномерный его прогрев, вследствие чего снижается вязкость нефти. В результате этого температура в добычном участке может достигать значения 70°С и выше [174].

Системы кондиционирования воздуха (СКВ) применяются не только на глубоких рудниках и шахтах с целью формирования комфортных условий труда, а также на неглубоких подземных горнодобывающих предприятий (до 500 м) [175]. Связано это с тем, что температура горных пород на неглубоких подземных горнодобывающих предприятиях сравнительно мала (7–12 °C). В этом случае при поступлении теплого воздуха в шахту (рудник) он охлаждается, и на стенках горного массива выпадает конденсат. Серьезные негативные последствия этот процесс приносит в соляных рудниках, в которых при контакте солей и влаги образуется электролит, вызывающий быстрое разрушение оборудования, расположенного в руднике. Также выпадение влаги приводит к затоплению выработок, разрушению целиков. При выпадении влаги на конвейерной линии возникает пробуксовка конвейерной ленты на барабане (с возможностью ее воспламенения) и т.д.

Однако на работу существующих СКВ требуются затраты электроэнергии, соизмеримые с общими затратами на проветривание всего подземного горнодобывающего предприятия. В связи с этим их применение ограничено, а на шахтах и рудниках, где СКВ применяются, зачастую наблюдается низкая эффективность их работы [176–183].

1.5.1. Способы нормализации микроклиматических условий и осушения воздуха на подземных горнодобывающих предприятиях

Обеспечение требуемых санитарно-гигиенических условий труда горнорабочих является одной из главных задач при добыче полезного ископаемого подземным способом. Для решения этой задачи разрабатываются и внедряются различные традиционные и нетрадиционные способы.

К нетрадиционным способам охлаждения шахтного воздуха относятся следующие:

- 1. Охлаждение воздуха льдом (на некоторых рудниках Канады) [184, 185]. Однако такой способ подходит для районов с холодным климатом, когда есть возможность заготовки льда в больших объемах без применения специальных систем.
- 2. Осушение воздуха сорбентами, например, при помощи хлористого кальция [184]. Подобный способ связан с затратами на получение хлористого кальция, которые образуется при прокаливании гексагидрата при температуре 200 °C.
- 3. Охлаждение воздуха жидким воздухом, который при испарении поглощает тепло [184, 186]. Использование этой технологии ограничено ввиду того, что транспортирование жидкого воздуха в шахту (рудник) необходимо производить по трубопроводу, снабженному надежной теплоизоляцией при защищенности от опасности взрыва.

Также существует традиционный способ улучшения климатических условий в шахте за счет увеличения общего количества подаваемого в нее воздуха. В этом случае охлаждение предполагается за счет увеличения скорости движения воздуха. Однако скорость потока воздуха в горных выработках не должна превышать установленных в правилах [91] значений. Также увеличение скорости потока воздуха влечет за собой неоправданно большие затраты электроэнергии на работу ГВУ. Поэтому подобный способ также малоэффективен.

К традиционным можно отнести способы, приведенные в работах [187, 188], где предложено передвигать охлаждающую установку вслед за крепью или использовать вихревую трубу. В обоих случаях не предусмотрено решение вопроса утилизации тепла и сброса нагретого в конденсаторе охлаждающей установки воздуха. В этом случае нагретый воздух вновь попадает в рабочую зону.

В связи с низкой эффективностью предложенных в настоящее время нестандартных способов нормализации самым распространенным способом для

нормализации микроклиматических условий является использование традиционных СКВ. Поэтому необходимо разработать способы их применения, позволяющие снизить затраты электроэнергии на их работу при сохранении эффективности процесса охлаждения.

1.5.2. Проблемы обеспечения требуемых санитарно-гигиенических условий труда в рабочей зоне нефтяных шахт

В зависимости от физико-химических свойств нефти определяется способ ее добычи. В мировой практике существует достаточно большое количество таких способов, позволяющих эффективно осуществлять настоящий процесс, но особую сложность вызывает добыча высоковязкой нефти. Уникальным является способ добычи, применяемый на Ярегском нефтетитановом месторождении высоковязкой нефти (12 000–16 000 мПа·с при пластовой температуре 6–8 °C), который носит название «термошахтный» способ добычи [172, 173, 189, 190]. Способ предполагает закачку в продуктивный пласт перегретого пара. После проникновения пара в пласт происходит его равномерный прогрев. В результате этого повышения температуры пласта находящаяся в нем нефть из твердого состояния переходит в жидкое, т.е. становится более текучей, после чего появляется возможность ее добычи.

В настоящее время технология реализована в основном двумя системами разработки [189].

1. Двухгоризонтаная система (рисунок 1.11), при которой закачивание пара ведут с надпластового горизонта, расположенного выше кровли на 10–30 м, через вертикальные и крутонаклонные скважины, а отбор нефти осуществляется из пологовосходящих добывающих скважин длиной до 300 м, пробуренных из расположенной в продуктивном пласте галереи.

2. Поверхностно-подземная система разработки, при которой горная выработка проходится в продуктивном пласте или ниже него, а добывающие скважины бурятся пологонаклонными и располагаются рядами (рисунок 1.12).

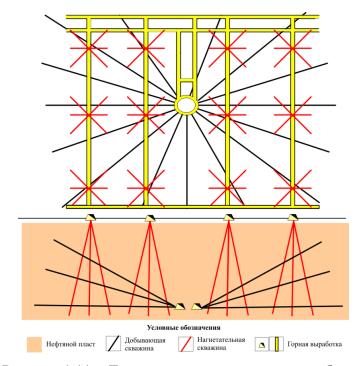


Рисунок 1.11 — Двухгоризонтная система разработки

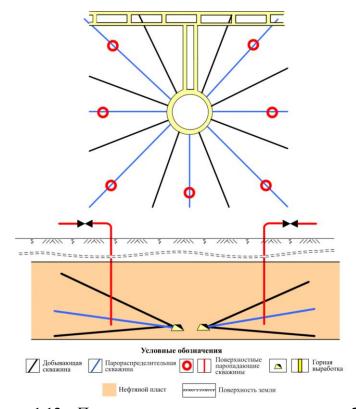


Рисунок 1.12 – Поверхностно-подземная система разработки

Реализация приведенных систем разработки позволила существенно повысить коэффициент извлечения нефти. Однако термошахтный способ имеет один существенный недостаток — значительные тепловыделения в горные выработки, в результате чего возникают две проблемы:

- 1. Нарушаются санитарно-гигиенические условия труда горнорабочих в рабочей зоне и исходящих горных выработках.
- 2. Снижается эффективность прогрева пласта в результате утечек тепла от горного массива, что приводит к необходимости использования дополнительного объема перегретого пара и, как следствие, дополнительным финансовым затратам на его подготовку.

Для решения этой проблемы предлагаются различные нестандартные способы.

В работе [191] описана конструкция теплообменного устройства, специально разработанного под нужды нефтяных шахт [192]. Однако при использовании данного устройства не рассматривается проблема охлаждения пласта, а также не доказана эффективность его применения.

Существует предложения, например в работе [193], по частичной теплоизоляции горных выработок в уклонном блоке (добычном участке). Но со временем теплоизоляция сама нагревается ввиду потери теплоизоляционных свойств [194], т.е. при этом решении через некоторое время проблема появится вновь. Кроме того, теплоизоляция не поглощает тепло от разогретого пласта, следовательно, постепенно тепло от него будет перемещаться в сторону неизолированного участка. В этом случае разогреты будут горные выработки за теплоизоляцией, т.е. проблема также не будет устранена. Это решение невыгодно и с точки зрения финансов: тепловые потери на разогрев пласта за границами теплоизоляционного слоя и закупка самих дорогостоящих теплоизоляционных материалов. Но самая главная проблема заключается в том, что основные тепловыделения, составляющие 60–70 % от всего тепла, выделяемого в буровой галерее, происходят через добычные скважины [195]. За счет теплоизоляции горных выработок эта проблема также не решается. В работе [196] предложено использовать радиационный кондиционер для ускоренного формирования теплоуравнивающих рубашек вокруг горных выработок. Однако подобный способ потребует значительных финансовых затрат на кондиционирование воздуха, в результате чего снизиться температура пласта, что повлечет за собой снижение нефтедобычи.

В настоящее время принято решение использовать традиционный способ поддержания требуемых санитарно-гигиенических условий труда в буровой галерее. Для этого в работе [197] предлагается в буровую галерею уклонного блока через воздухоподающую скважину из поверхностной СКВ закачивать холодный воздух (рисунок 1.13). Выдача воздуха на поверхность предполагается по воздуховыдающей скважине, пробуренной на выходе из буровой галереи. Подобный способ проветривания позволит снизить температуру воздуха в буровой галерее, но в этом случае при реализации указанного способа, возникнут следующие проблемы:

- 1. Охлажденный воздух будет контактировать с разогретым пластом. В этом случае нагреваемый пласт будет охлаждаться, в результате чего снижается эффективность разогрева пласта и увеличивается расход пара на его разогрев, т.е. это дополнительные финансовые затраты.
- 2. Воздух в буровой галерее нагревается, и в исходящих горных выработ-ках будут нарушены санитарно-гигиенические условия труда.
- 3. Подаваемый с дневной поверхности воздух в холодное время года необходимо нагревать до температуры не ниже +2°C [198]. Поэтому в холодный период появляются дополнительные затраты на воздухоподготовку.
- 4. Воздуховыдающая скважина будет иметь большее аэродинамическое сопротивление, чем у исходящих горных выработок, в связи с чем на поверхность из буровой галереи будет выдаваться лишь незначительная часть воздуха.
- 5. Помимо затрат на проветривание, которые достигают половины всей потребляемой электроэнергии [199], потребуются затраты электроэнергии на работу СКВ. Согласно [200–202], при подобном способе воздухоподготовки затраты электроэнергии на кондиционирование будут соизмеримы с таковыми

на проветривание нефтяной шахты. При этом, работая по рассматриваемой схеме, СКВ не сможет в полной мере обеспечить нормализацию микроклиматических условий в добычном участке и за его пределами [203, 204].

Таким образом, актуальной является задача разработки способа проветривания нефтяных шахт, при котором будут обеспечены требуемые санитарно-гигиенические условия труда в уклонном блоке (добычном участке) при минимизации затрачиваемых энергоресурсов.

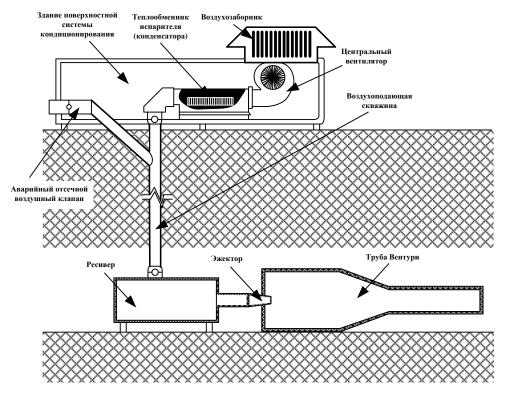


Рисунок 1.13 – Схема подачи воздуха в воздухоподающую скважину нефтешахты

1.6. Цели и задачи исследований

На основании проведенного анализа выяснилось, что используемые в настоящее время способы проветривания подземных горнодобывающих предприятий не способны в полной мере совмещать функции по эффективности и оптимизации затрат на снабжение их потребным количеством воздуха с требованиями безопасности.

В связи с этим целью настоящей работы является разработка основ эффективного управления безопасностью в подземных горнодобывающих предприятиях в нормальном и аварийном режимах их работы, а также обеспечение

нормализации рудничной атмосферы и требуемых санитарно-гигиенических условий труда горнорабочих путем оптимального энергоэффективного проветривания.

Для достижения цели требуется решить следующий ряд задач:

- 1. Выполнить экспериментальные исследования на действующих рудниках для определения факторов, значимо влияющих на эффективность проветривания и разработать методику управления режимами работы ГВУ с учетом инерционности процесса воздухораспределения между горными выработками.
- 2. Исследовать причины низкой эффективности работы существующих ШКУ.
- 3. Разработать основы эффективного и безопасного управления воздухоподготовкой в холодное время года.
- 4. Определить наиболее значимые факторы, влияющие на эффективность работы ШКУ и разработать новые энергоэффективные их конструкции, а также способы воздухоподготовки в холодное время года, позволяющие безопасно и эффективно осуществлять нагрев воздуха, поступающего в воздухоподающие стволы.
- 5. Разработать систему управления проветриванием подземных горнодобывающих предприятий, позволяющую обеспечивать высокую эффективность и безопасность работ в нормальном режиме и при возникновении нештатной ситуации.
- 6. Разработать способы управления воздухораспределением между подземными горными выработками и защиты горнорабочих при возникновении нештатных ситуаций.
- 7. Разработать способы обеспечения требуемых санитарно-гигиенических условий труда на глубоких рудниках и нефтяных шахтах, а также энергоэффективные способы осуществления кондиционирования и осушения воздуха на неглубоких рудниках.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ОСНОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРОВЕТРИВАНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СЛУЧАЙНЫХ ФАКТОРОВ

На эффективность процесса проветривания оказывает влияние большое число факторов, существенно значимыми из которых являются:

- 1. Величина и направление общерудничной (общешахтной) естественной тяги, действующей между шахтными стволами.
- 2. Инерционность системы проветривания подземного горнодобывающего предприятия.
- 3. Действие в добычных участках источников тяги как искусственных (вентиляторов), так и естественных, возникающих между подземными горными выработками, а также изолирующих устройств (шахтных вентиляционных перемычек).
 - 4. Режим работы ГВУ и системы воздухоподготовки.
 - 5. Внешние утечки воздуха.

Эти факторы условно можно разделить на объективные и субъективные.

Режим работы ГВУ и воздухоподготовки, а также величину внешних утечек воздуха можно изменять, а вот величина общерудничной естественной тяги, которая зависит от атмосферных параметров воздуха, или инерционность системы проветривания являются не зависящими от деятельности на предприятии.

Однако при регулировании режимов работы ГВУ и системы воздухоподготовки на эффективность их работы влияют случайные факторы и величина самой общерудничной естественной тяги: при изменении режимов работы системы воздухоподготовки изменяются параметры воздуха, поступающего в воздухоподающие стволы. Изменение объемного расхода воздуха, поступающего в подземные горные выработки, приводит к тому, что между ними изменяется воздухораспределение и, следовательно, все связанные с этим процессы, в том числе условно не зависящая от системы управления инерционность процесса проветривания. Исходя из этого, можно сделать вывод, что ввиду взаимосвязи между всеми процессами ими можно управлять. Но для этого необходимо установить их взаимовоздействие и степень влияния друг на друга при учете влияния внешних случайных факторов.

Таким образом, для управления процессом проветривания необходимо определить факторы, значимо влияющие на воздухораспределение как между стволами, так и между подземными горными выработками, и разработать способ регулирования режимов работы исполнительных устройств системы вентиляции с учетом этих факторов. Причем система управления должна осуществлять проветривание подземного предприятия в энергосберегающем, но безопасном режиме.

2.1. Применение методов статистического анализа при решении задач управления проветриванием подземных горнодобывающих предприятий

В большинстве проводимых исследований, направленных на определение зависимости воздухораспределения между горными выработками, учеными изначально математически описывается объект и выводятся математические формулы, по которым рассчитываются изменения в системе. Однако каждое подземное горнодобывающее предприятие по сути является уникальным объектом: в нем отличается взаимное расположение стволов, глубина и геометрия залегания полезного ископаемого, длина и размеры горных выработок, количество добычных участков и т.д. Помимо того, что часть этих параметров изменяется (увеличивается количество добычных участков, проходимых горных выработок и т.д.), на процесс проветривания действуют внешние факторы – изменение параметров наружного воздуха, изменение газо-воздушной обстановки под землей. Кроме того, существуют случайные факторы, которые в модели управления проветриванием описать достаточно сложно. К таким факторам относятся, например, резкое изменение параметров наружного воздуха, обрушение породы в горной выработке и т.д.

Существуют работы, описывающие влияние на процесс проветривания движущегося в горных выработках и тоннелях самоходного транспорта, а также управление режимами работы вентиляторов с учетом этого действия [26–28, 30, 31]. Однако для того, чтобы эти расчеты можно было применять в системе управления, нужно знать точное время возникновения этого воздействия и уметь определять степень их влияния. И даже в этом случае нельзя с уверенностью говорить, что полученные математические зависимости с высокой степенью точности позволят управлять процессом проветривания, так как этот процесс инерционный и, в зависимости от других внешних факторов, воздухораспределение может быть разным в различных ситуациях.

С целью построения модели, адекватно описывающей изменение воздухораспределения от внешних факторов, а также позволяющей на конкретном подземном горнодобывающем предприятии осуществлять процесс проветривания с учетом случайных обстоятельств, присущих именно этому объекту, необходимо проведение на нем серии экспериментов и установление зависимостей по полученным в ходе исследований данным.

Для того чтобы в ходе эксперимента возможно было получить искомую аналитическую модель, прежде всего необходимо определить, имеет ли вообще смысл делать это на основе имеющейся совокупности. В процессе сбора данных могут оказаться «ложные» величины, и полученная выборочная совокупность не позволит отразить в достаточной степени исследуемые свойства генеральной совокупности значений случайной величины. В частности, может оказаться, что объем выборочной совокупности мал или сами данные имеют малую точность, или данных достаточно и они достаточно точны, но при этом они неудачно сгруппированы и представляют свойства только части генеральной совокупности. Наконец, может оказаться, что выдвинутая в начале исследования гипотеза о существовании зависимости между случайными величинами неверна, и устанавливать вид этой зависимости бессмысленно [205–215].

Корректность математической модели и возможность ее применения на практике зависят от того, насколько грамотно спланирован эксперимент, насколько корректно с точки зрения математической статистики проведены процедуры сбора, обработки и анализа результатов эксперимента, и, наконец, насколько корректно выполнена интерпретация полученных результатов. При этом следует отметить, что любые аналитические модели, строящиеся на основе опытных данных, не могут иметь точность, превышающую точность измерения самих данных.

Согласно теории математической статистики, основными задачами в эксперименте являются [205–215]:

- 1. Сбор и первичная обработка выборочных данных.
- 2. Оценка числовых характеристик выборочных данных и подбор законов их распределения.
 - 3. Корреляционно-регрессионный анализ многомерных совокупностей.
 - 4. Построение и оценка точности полученных регрессионных зависимостей.

Интерпретация полученных результатов и оценка точности прогнозов, которые можно выполнить с помощью полученных регрессионных моделей, завершают процедуры обработки экспериментальных данных.

Таким образом, в результате грамотно проведенной серии экспериментов возможно определить значимые факторы, влияющие на процесс проветривания конкретного горнодобывающего предприятия, и построить для него модель, позволяющую с заданной доверительной вероятностью управлять процессом проветривания в безопасном и энергосберегающем режиме.

2.2. Оценка значимости факторов, влияющих на безопасность процесса проветривания, на основе экспериментальных исследований

Для обеспечения безопасности ведения горных работ на подземных горнодобывающих предприятиях необходимо снабжать его добычные участки

потребным количеством свежего воздуха. Расчет количества воздуха, необходимого для проветривания подземного горнодобывающего предприятия, в настоящее время определяется позабойным методом, при котором требуемый для нормального функционирования шахты (рудника) объемный расход воздуха подсчитывается для каждого отдельного участка: забоя, добычного участка, камеры служебного назначения и т.д. После этого полученные значения объемного расхода воздуха суммируются [17]. Полученное значение объемного расхода воздуха является актуальным для определенного периода отработки шахтного поля.

Установленный в ходе расчетов объемный расход воздуха, подаваемого в шахту (рудник), может корректироваться по результатам проведенной воздушно-депрессионной съемки. При этом, согласно [91], воздушно-депрессионную съемку (ВДС) необходимо проводить не реже одного раза в 3 года (на труднопроветриваемых шахтах не реже одного раза в год). Эти сроки четко выполняются, и в связи с тем, что это затратное мероприятие как по времени, так и финансово, чаще указанных сроков ВДС практически никогда не проводятся. В остальное время регулирование объемного расхода воздуха, подаваемого в подземную часть предприятия, не осуществляется. Однако и в ранних работах [4, 19, 141, 216, 217, 218, 228] и более поздних [8, 23, 219, 220, 227, 229] отмечается, что на процесс подачи воздуха в шахтные стволы значительное влияние оказывает общерудничная естественная тяга, которая, в свою очередь, зависит от параметров воздушной среды в шахтных стволах и может значительно изменяться при колебаниях параметров наружного воздуха и системы воздухоподготовки.

Проведенный в п. 1.1 анализ показал, что в настоящее время отсутствует общепринятая точка зрения на механизм возникновения естественной тяги, а также о факторах, влияющих на ее величину и направление. Для оценки этих факторов было принято решение на одном и том же руднике провести серию испытаний в различное время года при различных режимах работы ГВУ. Для определения характера изменения общерудничной естественной тяги при

естественном изменении плотности воздуха, без воздействия на этот процесс внешних факторов, а только природного изменения климата, решено было провести серию экспериментов при отключении ГВУ.

2.2.1. Порядок сбора и обработки опытных данных и их первичная обработка с целью достоверной интерпретации результатов измерений с учетом стохастического характера воздухораспределения между шахтными стволами

Эффективность управления процессом проветривания в первую очередь зависит от того, насколько достоверные данные получены в ходе проведения измерений воздухораспределения между горными выработками (в частности между стволами). Если предположить, что ГВУ работает с постоянной производительностью и на нее не действуют никакие внешние факторы, то расположив измерительные приборы (датчики) в околоствольных дворах воздухоподающих и вентиляционного стволов, а также на дневной поверхности и в каналах ГВУ, можно будет определить воздухораспределение между стволами [13, 223]. При этом в любой точке каждого из стволов скорость потока воздуха должна быть одинаковой, а датчики не должны иметь погрешности.

Ввиду того, что подобные условия обеспечить невозможно, следует учитывать влияние на процесс проветривания различных стохастических факторов, погрешность приборов и неравномерность скоростных потоков по сечению выработки, а также инерционность процесса проветривания.

В первую очередь необходимо правильно интерпретировать информацию, полученную с датчиков. Несмотря на то что в настоящее время разработаны датчики, способные определять измеряемые величины (в частности скорость потока воздуха) с высокой степенью точности [224, 225], для получения достоверной информации требуется учитывать место их расположения, так как даже в одном сечении выработки, а тем более шахтного ствола, воздух двигается с различной скоростью.

Если в расчеты будут занесены «неправильные» измеренные параметры или выполненные некорректно, то расчеты, сделанные на их основе, также будут ошибочными.

Кроме того, при измерении производительности ГВУ и развиваемого ею давления наблюдаются «скачки» значений. Основной причиной подобного явления являются собственные колебания вала вентилятора [55]. Ввиду того, что от этого негативного явления в полной мере избавиться невозможно, необходимо усреднить измеренные значения при помощи методов строгой математической статистики [205–215], исключая «ложные» данные.

Проверка данных на «ложность» выполняется следующим образом.

В каждой серии измерений данные полученной выборочной совокупности располагаются в порядке возрастания: $x_{(1)} \le x_{(2)} \le \dots \le x_{(m)}$. Затем определяются крайние элементы $x_{(1)} = x_{\min}$ и $x_{(m)} = x_{\max}$. Если данные x_{\min} и x_{\max} значительно отличаются, то следует выполнить статистическую проверку двух конкурирующих гипотез H_0 и H_1 :

- нулевая гипотеза H_0 все исходные данные получены при неизменных условиях, и выборочную совокупность можно считать однородной;
- конкурирующая гипотеза H_1 значение одного из результатов x_{\min} или x_{\max} (или обоих вместе) получено при существенно изменившихся условиях (и тогда эти значения необходимо исключить из выборочной совокупности как «ложные»).

Далее необходимо рассчитать опытные значения статистики Стьюдента au^{on} , точнее, характеристики $au^{\text{on}}_{\text{min}}$ и $au^{\text{on}}_{\text{max}}$ [205–215]:

$$\tau_{\min}^{\text{on}} = \frac{\left| x_{\min} - \overline{x} \right|}{S_{\text{max}}} \, \text{M} \, \tau_{\max}^{\text{on}} = \frac{\left| x_{\max} - \overline{x} \right|}{S_{\text{max}}}. \tag{2.1}$$

Здесь \bar{x} — это среднее значение опытных данных, вычисляемое по исходной совокупности объема m по следующей формуле:

$$\overline{x} = \overline{x}(m) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} x_i,$$
 (2.2)

где $S_{\text{изм}}$ — исправленное (из-за малости объема представленных выборок) выборочное среднеквадратичное отклонение (дисперсия), характеризующее разброс опытных значений случайной величины X вокруг среднего выборочного \overline{X} :

$$S_{\text{H3M}} = S_{\text{H3M}}(m) = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^{m} (x_i - \bar{x})^2} . \tag{2.3}$$

Величина $S_{\mbox{\tiny ИЗМ}}$ также вычисляется по исходной совокупности опытных данных.

Величины $_{min}^{\circ n}$ и $_{max}^{\circ n}$ характеризуют величину отклонения крайнего значения случайной величины (x_{min} или x_{max}) от ее среднего значения x с учетом среднего разброса x значений случайной величины x в выборочной совокупности.

Далее опытные значения критерия Стьюдента τ_{min}^{on} и τ_{max}^{on} необходимо сравнить с его критическими (теоретическими) значениями $\tau^{\text{крит}}(\alpha, k)$, которые ищутся в статистических таблицах при заданном числе степеней свободы k = m - 1 и заданном значении уровня значимости α . В систему управления критические значения заносятся в базу данных.

Уровень значимости α — это вероятность совершить ошибку первого рода, т.е. отвергнуть верную гипотезу.

Если неравенство $\tau^{\text{оп}} \leq \tau^{\text{крит}}(\alpha, k)$ выполняется, то гипотеза H_0 не отвергается. В этом случае считаем, что с вероятностью $p = 1 - \alpha$ проверяемое значение x_{min} (или x_{max}) не является ложным, и в этом случае его оставляют в выборке. В противном случае исследуемое значение удаляют из исходной выборочной совокупности.

При этом каждый раз после исключения очередного из ложных экспериментальных значений, характеристики $\overset{-}{x}$ и $S^2_{_{\rm HSM}}$ необходимо пересчитывать по оставшейся выборке. Таким образом, проводится исключение ложных данных в каждой из серий по отдельности.

Для оставшихся в исследуемой серии опытных данных выполняется оценка ее дисперсии с помощью исправленной дисперсии $S^2_{\scriptscriptstyle \rm HSM}$. Таким образом, обрабатывается каждая из серий экспериментальных данных по очереди.

Далее сравниваются дисперсии различных серий между собой. Дисперсии должны быть однородными [205–215]. Однородность дисперсий означает, что данные были получены с одинаковой точностью.

Однородность дисперсий по всей совокупности сравниваемых серий экспериментальных данных — необходимое условие создания базы данных информационной системы. Только в этом случае на нее можно опираться при дальнейших расчетах, в том числе в целях управления (автоматизированного) процессом проветривания. Сравнение можно выполнять, например, попарно сравнивая дисперсии серий между собой.

В результате в итоговой совокупности остаются серии с однородными дисперсиями, что гарантирует достоверность последующих расчетов и анализа результатов.

Оценка однородности дисперсий выполняется с помощью критерия Φ ишера, опытное значение F^{on} которого вычисляется по формуле [205, 206, 226]:

$$F^{\text{off}} = \frac{S_1^2}{S_2^2},\tag{2.4}$$

где в числителе располагается большая из дисперсий.

Опытное значение критерия Фишера необходимо сравнить с критическим значением $F^{\text{крит}}(\alpha; k_1; k_2)$, которое ищется в статистических таблицах при заданном уровне значимости α и заданных значениях чисел степеней свободы k_1, k_2 [205, 206, 226].

Если $F^{\text{оп}} > F^{\text{крит}}(\alpha; k_1; k_2)$, то дисперсии в сравниваемых сериях следует считать неоднородными (различными). Это означает, что измерения выполнены с различной степенью точности, и их нельзя включать в единую базу данных. Поэтому если в ходе обработки данных встречается серия с отличной

от других серий дисперсией, то ее требуется исключить из базы экспериментальных данных, а соответствующие эксперименты в случае необходимости повторить.

2.2.2. Экспериментальные исследования на действующих подземных горнодобывающих предприятиях при отключении ГВУ

Ранее в работе [33] для определения влияния естественной тяги на процесс проветривания на руднике РУ-3 РУП ПО «Беларуськалий» были приведены результаты измерений в ходе экспериментов. Авторы этой работы утверждают, что при отключенной ГВУ изменение параметров наружного воздуха не будет являться причиной изменения воздухораспределения между стволами. Однако следует отметить, что выводы о перераспределении воздушных потоков в этой работе делались на основании опытных данных, полученных сразу после отключения ГВУ, а также через 15 минут и через 2 часа после этого.

В то же время в работах [17, 35, 221] установлено, что в случае остановки и реверса ГВУ, на протяжении последующих 30–90 минут отработанное пространство начинает играть роль источников тяги, если пустоты в нем имеют достаточно большой объем (как в случае с рудником РУ-3). И в результате воздух в рудник (шахту) поступает как по воздухоподающим, так и по вентиляционному (при реверсе ГВУ) стволам. Следовательно, в такой ситуации доминирующее влияние на воздухораспределение оказывает не общерудничная естественная тяга, возникающая между шахтными стволами (незначительная в этой ситуации по сравнению с возникающей депрессией), а наличие под землей значительных объемов выработанного пространства.

Для исследования факторов, оказывающих влияние на величину естественной тяги, возникающей между шахтными стволами при отключенной ГВУ, на руднике БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий» были проведены серии экспериментов.

Отключение ГВУ было произведено в 22.00. Измерения параметров воздуха далее производились непрерывно в течение 6 часов через каждые 20–40 минут. При этом измерения выполнялись одновременно (т.е. синхронно) как под землей, так и на поверхности при помощи переносных приборов. Под землей параметры воздуха измерялись последовательно: сначала в околоствольном дворе одного воздухоподающего ствола, затем другого, а в конце каждого из опытов — в околоствольном дворе вентиляционного ствола. Одновременно на поверхности измерялись параметры наружного воздуха.

Все полученные данные были проверены по методике, приведенной выше в п. 2.2.1.

Результаты этих измерений, выполненных при отключении ГВУ, приведены в таблице 2.1 и отражены на рисунке 2.1 [222].

Параметры воздуха в стволах обозначены следующим образом: T_1 , T_2 и T_3 – значения температуры воздуха в околоствольных дворах шахтных стволов, ${}^{\circ}$ С; p_1 , p_2 и p_3 – значения барометрического давления в околоствольных дворах в 1-м и 2-м воздухоподающих и в 3-м вентиляционном стволах соответственно, мм рт. ст; Q_1 , Q_2 и Q_3 – объемный расход воздуха в 1-м, 2-м воздухоподающих и в 3-м вентиляционном стволах соответственно, м 3 /с.

Результаты первого из выполненных замеров представлены в таблице 2.1 (см. результаты этого измерения в строке № 1). В этот момент температура наружного воздуха составляла $T_{\rm hap}=13.2~{\rm ^oC},~$ а атмосферное давление $P_{\rm a}=730.7~$ мм рт. ст. (97 426 Па).

Как следует из данных, приведенных в таблице 2.1 и рисунке 2.1, после отключения ГВУ воздух не менее 20 минут продолжал двигаться в установленном ранее направлении (за счет влияния выработанного пространства), что согласуется с результатами работ [17, 35, 221]. Через 40 минут после начала эксперимента (измерение № 3, таблица 2.1) направление движения воздуха изменилось в 1-м воздухоподающем и в вентиляционном стволах. Еще через час, т.е. в 23.40 (измерение № 5, таблица 2.1), по всем стволам воздух стал двигаться в противоположном направлении.

Вплоть до окончания эксперимента (т.е. на протяжении последующих 4,5 часа) воздух продолжал двигаться в установившемся направлении. При этом объемный расход воздуха в стволах менялся незначительно (измерения № 6—14, таблица 2.1). Соответствующие графики изменения величины объемного расхода воздуха приведены на рисунке 2.1.

Таблица 2.1 — Параметры воздуха, полученные в результате проведения измерений на руднике БКПРУ-2 при отключении ГВУ (ПАО «Уралкалий»)

№ п/п	Время проведения измерений	Параметры наружного воздуха		Параметры воздуха в стволе № 1			Параметры воздуха в стволе № 2			Параметры воздуха в стволе № 3		
11/11		T _{нар} , °С	$p_{\rm a}$, MM pt. ct.	T_1 , °C	p_1 , мм рт. ст.	$Q_1, {\rm m}^3/{\rm c}$	T₂, °C	р2, мм рт. ст.	Q_2 , M^3/c	<i>T</i> ₃ , °C	p_3 , мм рт. ст.	$Q_3, {\rm M}^3/{\rm c}$
1	22.00	13,2	730,712	17,6	776,635	167,78	17,3	777,181	169,15	15,3	774,156	336,77
2	22.20	13,4	731,112	18,1	769,157	88,74	18,3	770,230	91,14	16,0	764,232	179,79
3	22.40	13,6	731,798	19,5	765,655	-22,56	19,3	765,625	15,18	16,9	753,811	-37,63
4	23.20	14,1	732,120	19,7	765,232	-28,08	19,4	765,132	10,89	16,3	753,123	-44,14
5	23.40	13,6	732,090	19,7	765,528	$-30,\!48$	19,5	765,311	-13,20	16,5	754,203	-43,15
6	00.20	14,3	732,038	18,9	765,208	-27,36	19,5	765,104	-12,21	16,3	754,158	-38,73
7	00.40	13,8	731,798	19,3	765,383	-27,36	19,7	765,243	-12,87	16,5	754,324	-37,98
8	01.20	13,3	731,813	18,7	765,535	-26,16	19,5	765,510	-12,21	16,2	754,218	-40,23
9	01.50	13,4	731,843	19,3	765,631	-28,32	19,0	765,588	-12,87	16,6	753,712	-41,65
10	02.10	13,3	731,821	18,9	765,581	-27,84	19,0	765,107	-12,54	16,2	754,213	-37,89
11	02.40	13,2	731,798	18,7	765,231	-28,08	18,8	765,144	-9,9	16,4	753,121	-40,18
12	03.00	13,1	731,760	18,7	765,357	-27,84	19,1	765,223	-11,22	16,2	754,212	-41,35
13	03.30	13,4	731,655	18,9	765,325	-29,76	18,7	765,217	-11,22	16,1	754,209	-43,36
14	04.10	13,5	731,663	18,8	765,403	-28,32	18,9	765,364	-11,88	16,4	754,201	-41,30

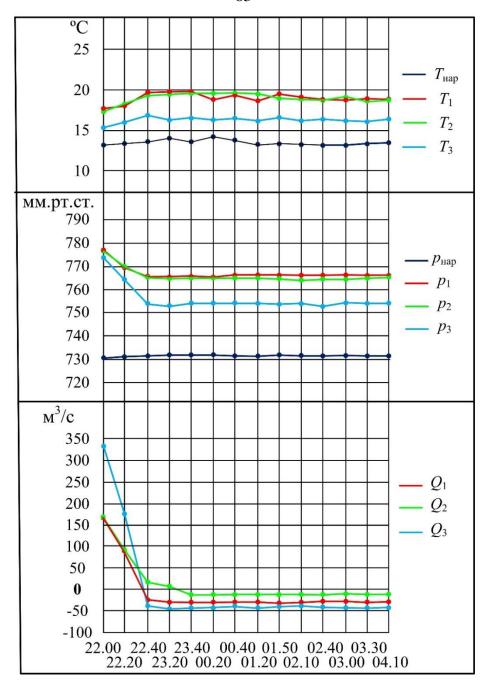


Рисунок 2.1 – Графики изменения параметров воздуха в период испытаний при отключении ГВУ

Учитывая тот факт, что на протяжении всех оставшихся 4,5 часа эксперимента воздух в рудник поступал по стволам без применения каких-либо искусственных источников тяги, то можно говорить, что его проветривание осуществлялось за счет общерудничной естественной тяги.

Таким образом, для возникновения естественной тяги не потребовалось каких-либо других условий, кроме изменения параметров наружного воздуха, а воздухораспределение между стволами зависело от ее величины и направления. Поэтому использование термина «естественная» тяга для объяснения особенностей воздухообмена в рассматриваемом случае является обоснованным.

При этом из данных табл. 2.1 видно, что параметры наружного воздуха $(T_{\text{нар}}, p_{\text{а}})$ за все время проведения эксперимента (т.е. за все 6,5 часа) менялись незначительно, в результате чего и общерудничная естественная тяга не должна была изменяться существенно, а объемный расход воздуха в шахтных стволах также не должен был заметно изменяться, что подтверждают результаты измерений (таблица 2.1).

В случае принудительного изменения производительности ГВУ необходимо выяснить роль «естественной» составляющей общерудничной естественной тяги при проветривании, т.е. как и за счет чего может изменяться ее величина и направление. Другими словами, необходимо выяснить, как происходит совместная работа естественной тяги и ГВУ.

Для выяснения механизма этого взаимодействия на том же руднике (БКПРУ-2, ПАО «Уралкалий») были произведены измерения производительности ГВУ при различных скоростях вращения рабочего колеса вентилятора, а также измерения соответствующего развиваемого им (вентилятором) статического давления.

2.2.3. Экспериментальные исследования на действующих подземных горнодобывающих предприятиях при различных режимах работы ГВУ и климатических условиях

Следует учитывать, что на правильность интерпретации полученных данных будет оказывать влияние инерционность процесса проветривания. Ввиду большой протяженности подземных горных выработок и наличия выработанного пространства при изменении производительности ГВУ объемный расход воздуха в воздухоподающих стволах изменится только через достаточно значительное время. Поэтому для исключения влияния инерционности процесса проветривания на управление системой подачи воздуха и его подготовки из-

мерения необходимо проводить в месте, где воздухораспределение при изменении режима работы ГВУ изменяется сравнительно быстро. Таким местом являются примыкающие к ГВУ участки – канал ГВУ (всасывающий) и диффузорный (нагнетательный) канал (рисунок 2.2).

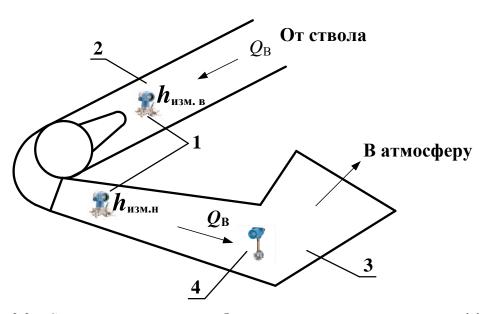


Рисунок 2.2 — Схема расположения приборов для измерения давления в диффузорном канале и канале ГВУ: I — датчик давления; 2 — канал ГВУ; 3 — диффузорный канал; 4 — расходомер (датчик расхода воздуха)

В 2016 и 2017 годах на руднике БКПРУ-2 (ПАО «Уралкалий») был выполнен ряд серий натурных экспериментов. В ходе каждого из двух проведенных экспериментов (летнего и зимнего) выполнялись измерения производительности ГВУ $Q_{\rm B}$ и соответствующие значения общешахтной депрессии (статического давления) $h_{\rm B}$ при различных скоростях вращения рабочего колеса вентилятора ($n_{\rm Beht}$).

В каждом из этих экспериментов было зафиксировано по 9 серий измерений, в каждой из серий — по 8–10 экспериментальных значений производительности $Q_{\rm B}$ ГВУ и соответствующих значений общешахтной депрессии $h_{\rm B}$.

На проведение девяти серий измерений в каждом из двух экспериментов (летнего и зимнего) было затрачено примерно по 20 минут (т.е. на каждую отдельную серию измерений затрачивалось около двух минут), в течение которых и было зафиксировано примерно по 10 значений величин $Q_{\rm B}$ и $h_{\rm B}$. Краткая

продолжительность времени, отведенного на проведение эксперимента, обусловлена необходимостью избежать значительных изменений параметров наружного воздуха (таких как температура, атмосферное давление, относительная влажность и т.п.), оказывающих значительное влияние на величину общерудничной (общешахтной) естественной тяги $h_{\rm e}$.

Эксперименты были проведены 6 июля 2016 года и 9 февраля 2017 года, т.е. соответственно летом и зимой. Параметры наружного воздуха в летнее время года были следующими: атмосферное давление $p_a = 737,0$ мм рт. ст. (98258,6 Па), температура наружного воздуха $T_{\rm наp} = 21,8$ °C (294,95 K), а в зимнее время года — $p_a = 779,8$ мм рт. ст. (103962,13Па), температура $T_{\rm нap} = -2,1$ °C (271,05 K).

В холодное время года температура воздуха, поступающего в воздухоподающие стволы (данные с датчиков на руднике), соответственно равна: ствол $\mathbb{N} = 1 - 13,9$ °C (отметка -25 м) и 10,7 °C (отметка -60 м); ствол $\mathbb{N} = 2 - 19,5$ °C (отметка -25 м) и 12,5 °C (отметка -60 м) – начало эксперимента. В конце эксперимента: ствол $\mathbb{N} = 1 - 14,5$ °C (отметка -25 м) и 14,4 °C (отметка -60 м); ствол $\mathbb{N} = 2 - 19,1$ °C (отметка -25 м) и 13,2 °C (отметка -60 м).

Результаты первого и второго экспериментов приведены соответственно в таблицах 2.3 и 2.4.

Экспериментальные значения производительности $Q_{\rm B}$ при различных скоростях вращения ($n_{\rm Beht, i}$) рабочего колеса ГВУ представлены на рисунке 2.3. К примеру, верхними графиками являются первые строки таблиц 2.2 и 2.3, соответствующие скорости вентилятора $n_{\rm Beht} = 375$ об/мин.

Обращает на себя внимание то, что на графиках (рисунок 2.3) выделяются из общей совокупности некоторые измеренные значения.

Предварительный анализ полученных выборочных совокупностей экспериментальных значений, приведенных в таблицах 2.2 и 2.3, указывает, что на результаты измерений, как и предполагалось ранее, воздействуют случайные факторы, которые не удается учесть во время проведения экспериментов.

Таблица 2.2 – Результаты измерений статического давления, развиваемого ГВУ, и соответствующей производительности при различной скорости вращения рабочего колеса вентилятора (лето)

No	Параметр								Значение			
п/п										параметра		
1	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	413	398	416	413	387	364	413	417		-	402,63
1	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	2618,30	2618,30	2667,34	2628,11	2657,53	2637,92	2628,11	2618,30	_	_	2634,24
2	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	376	371	363	373	374	360	375	375	359	362	368,80
2	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	2304,50	2284,89	2314,31	2294,69	2343,72	2275,08	2324,11	2284,89	2265,27	2284,89	2297,64
3	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	367	343	344	352	336	336	349	335	344	351	345,70
3	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	2029,92	1980,89	2039,73	2039,73	2029,92	2039,73	2020,11	2000,50	2039,73	2010,31	2023,06
4	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	296	307	312	306	303	295	310	315	296	328	306,80
4	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	1745,54	1735,73	1774,95	1784,76	1745,54	1804,37	1755,34	1765,15	1774,95	1765,15	1765,15
5	$Q_{\rm B}$, ${ m M}^3/{ m c}$	301	299	312	302	296	314	315	324	322	313	309,80
3	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	1676,89	1676,89	1686,70	1676,89	1706,31	1686,70	1725,92	1725,92	1725,92	1725,92	1701,41
6	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	287	283	279	293	272	260	263	273	266	279	275,50
0	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	1480,76	1529,80	1500,38	1490,57	1500,38	1470,96	1490,57	1500,38	1500,38	1480,76	1494,49
7	$Q_{\rm B},{\rm m}^{3}/{\rm c}$	235	221	254	247	249	244	266	270	243	249	247,80
/	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	1294,44	1314,05	1323,86	1274,83	1314,05	1304,25	1314,05	1294,44	1284,64	1284,64	1300,33
8	$Q_{\rm B}$, ${ m M}^3/{ m c}$	224	231	226	226	224	225	217	224	225	225	224,70
	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	1078,70	1068,90	1049,28	1068,90	1068,90	1078,70	1068,90	1068,90	1059,09	1049,28	1065,95
0	$Q_{\rm B}$, ${ m M}^3/{ m c}$	191	207	206	198	197	198	196	201	204	194	199,20
9	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	882,57	872,77	862,96	882,57	872,77	862,96	862,96	853,16	853,16	862,96	866,88

Примечание.

Замеры: № $1-n_{\text{вент},1}=375$ об/мин; № $2-n_{\text{вент},2}=350$ об/мин; № $3-n_{\text{вент},3}=325$ об/мин; № $4-n_{\text{вент},4}=300$ об/мин; № 5 (нормальный режим работы) $-n_{\text{вент},5}=295$ об/мин; № $6-n_{\text{вент},6}=275$ об/мин; № $7-n_{\text{вент},7}=250$ об/мин; № $8-n_{\text{вент},8}=225$ об/мин; № $9-n_{\text{вент},9}=200$ об/мин.

Таблица 2.3 – Результаты измерений статического давления, развиваемого ГВУ, и соответствующей производительности при различной скорости вращения рабочего колеса вентилятора (зима)

№ п/п	Параметр								Значение параметра			
1	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	410	416	404	399	415	411	416	412	391	378	405,2
	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	2696,83	2726,25	2706,64	2745,86	2667,41	2687,02	2736,06	2716,44	2726,25	2716,44	2712,52
2	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	375	382	362	360	383	385	395	394	396	346	377,8
	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	2412,44	2363,40	2412,44	2392,82	2422,24	2412,44	2402,63	2373,21	2363,40	2383,02	2393,80
3	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	356	369	356	366	353	341	331	332	355	355	351,4
3	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	2088,82	2098,62	2118,24	2088,82	2118,24	2108,43	2069,20	2098,62	2059,40	2137,85	2098,62
4	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	330	343	336	348	318	329	302	311	315	320	325,2
	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	1794,62	1775,00	1863,26	1784,81	1824,04	1824,04	1794,62	1824,04	1745,58	1775,00	1800,50
5	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	320	320	320	327	315	306	321	324	331	335	321,9
3	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	1735,78	1706,36	1706,36	1735,78	1686,74	1745,58	1765,20	1716,16	1725,97	1696,55	1722,05
6	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	302	290	297	294	297	286	294	308	297	301	296,6
U	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	1529,84	1500,42	1529,84	1529,84	1510,22	1549,45	1529,84	1549,45	1539,64	1490,61	1525,92
7	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	264	265	267	279	284	258	282	273	263	260	269,5
/	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	1235,64	1274,87	1265,06	1245,45	1274,87	1265,06	1255,25	1255,25	1265,06	1265,06	1260,16
8	$Q_{\rm B}$, ${ m M}^3/{ m c}$	241	241	234	238	247	236	240	249	249	249	242,4
	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	1029,70	1019,89	1039,51	1049,31	1029,70	1059,12	1049,31	1039,51	1029,70	1039,51	1038,52
9	$Q_{\rm B}$, ${ m M}^3/{ m c}$	224	226	218	225	220	222	214	215	224	220	220,8
	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	833,57	823,76	853,18	843,37	823,76	823,76	843,37	833,57	823,76	833,57	833,57

Примечание.

Замеры: № $1 - n_{\text{вент},1} = 375$ об/мин; № $2 - n_{\text{вент},2} = 350$ об/мин; № $3 - n_{\text{вент},3} = 325$ об/мин; № $4 - n_{\text{вент},4} = 300$ об/мин; № 5 (нормальный режим работы) $- n_{\text{вент},5} = 295$ об/мин; № $6 - n_{\text{вент},6} = 275$ об/мин; № $7 - n_{\text{вент},7} = 250$ об/мин; № $8 - n_{\text{вент},8} = 225$ об/мин; № $9 - n_{\text{вент},9} = 200$ об/мин.

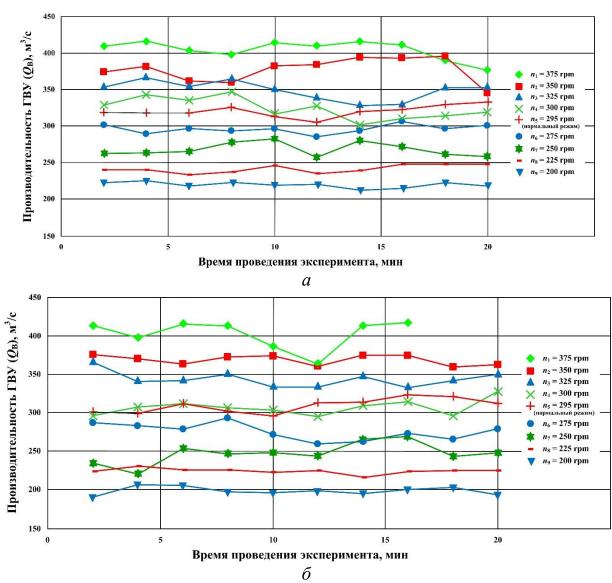


Рисунок 2.3 — Изменение производительности $Q_{\rm B}$ при различной скорости вращения рабочего колеса ГВУ (в течение эксперимента): a — в летнее время года; δ — в зимнее время года

Для примера первоначально расположим в порядке возрастания все данные из 1-й серии измерений производительности ГВУ $Q_{\rm B}$ (см. таблицу 2.2): 364, 387, 398, 413, 413, 413, 416, 417. Крайние элементы $Q_{\rm B(1)}=Q_{\rm min}$ и $Q_{\rm B(m)}=Q_{\rm max}$, то есть $Q_{\rm min}=364$ м³/с и $Q_{\rm max}=417$ м³/с.

Ввиду того что крайние элементы отличаются значительно, была выдвинута гипотеза H_0 (нулевая гипотеза) о том, что все исходные данные получены при неизменных условиях при конкурирующей гипотезе H_1 — значение одного из результатов Q_{\min} или Q_{\max} (или обоих вместе) получено при существенно изменившихся условиях.

Далее были вычислены величины $au_{\min}^{\circ n}$ и $au_{\max}^{\circ n}$ характеризующие величину отклонения крайнего значения случайной величины (Q_{\min} или Q_{\max}) от ее среднего значения \overline{Q} с учетом среднего разброса \overline{S} значений производительности ГВУ Q_{B} в выборочной совокупности.

Уровень значимости α в расчетах был принят равным 0,05.

Результаты расчета статистических характеристик для первой серии измерений производительности ГВУ $Q_{\rm B}$ занесены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты расчетов статистических характеристик для первой серии измерений (см. таблицу 2.2)

\overline{Q} , m^3/c	S	$ au_{_{ m OII}}^{min}$	$ au_{ m on}^{ m max}$
402,63	18,77	2,06	0,77

Поскольку $\tau_{\text{on}}^{\text{min}} > \tau_{\text{кр}} \ (0,05;7) \ (2,06 > 2)$, то гипотеза H_0 отвергается. В этом случае считается, что с вероятностью $p = 1-0,05 = 0,95 \ (95 \%)$ проверяемое значение Q_{min} является ложным, и оно удаляется из исходной выборочной совокупности.

Поскольку $\tau_{\text{on}}^{\text{max}} < \tau_{\text{кр}}(0,05;7) (0,77 < 2)$, то гипотеза H_0 принимается. В этом случае считается, что с вероятностью p = 0,95 проверяемое значение Q_{max} не является ложным, и оно оставляется в исходной выборочной совокупности.

После исключения $Q_{\min} = 364 \text{ м}^3/\text{с}$ как ложного экспериментального значения, снова выявлялись крайние элементы в оставшейся выборке, которые вновь проверялись на «ложность».

Для первой серии измерений новые крайние элементы имеют следующие значения: $Q_{\min} = 387 \text{ m}^3/\text{c}$ и $Q_{\max} = 417 \text{ m}^3/\text{c}$.

Результаты расчета статистических характеристик для оставшихся в серии измерений производительности ГВУ $Q_{\Gamma B Y}$ занесены в таблицу 2.5.

Таблица 2.5. – Результаты повторных расчетов статистических характеристик для первой серии измерений (см. таблицу 2.3).

$\overline{\overline{Q}}$, ${ m M}^3/{ m c}$	S	$ au_{_{ m on}}^{^{ m min}}$	$ au_{ ext{on}}^{ ext{max}}$
408,14	11,26	1,78	0,79

Значения au_{\min}^{on} и $au_{\max}^{\text{on}} < au_{\text{кр}}(0.05; 6) = 1.87$, поэтому гипотеза H_0 не отвергается. В этом случае считаем, что с вероятностью p = 0.95 проверяемые значения Q_{\min} и Q_{\max} не являются ложными, и они оставляются в выборочной совокупности.

Проведя аналогичные выкладки по всем сериям измерений, было выявлено 5 ложных экспериментальных значений производительности $Q_{\rm B}$ ГВУ и соответствующих значений общешахтной депрессии $h_{\rm B}$.

Полученные в ходе проведения первичной обработки измеренных данных летнего эксперимента значения приведены в таблице 2.6. При обработке данных зимнего эксперимента ложных данных не обнаружено.

Результаты летнего и зимнего экспериментов, в принципе, могут выполняться с различной точностью, что недопустимо с точки зрения статистического анализа, т.е. дисперсии двух сравниваемых выборочных совокупностей должны быть однородными.

Для проведения сравнительного анализа в таблицу 2.7 были сведены средние значения давления, развиваемого ГВУ, а также ее производительности в летний и зимний эксперименты при изменении скорости вращения рабочего колеса вентилятора.

Анализ данных, приведенных в таблице 2.7, указывает на то, что в период проведения летнего и зимнего экспериментов при больших скоростях вращения рабочего колеса вентилятора ГВУ (строки 1–3) производительность $Q_{\rm B}$ отличается незначительно — максимальное отклонение около 2,5 %. Разность давлений $h_{\rm B}$, развиваемых ГВУ при тех же скоростях вращения рабочего колеса вентилятора, отличается примерно на 4 %.

/

Таблица 2.6 – Результаты измерений на ГВУ, после исключения «ложных» данных (лето)

No	Помомоти								Значение			
Π/Π					11	араметр						параметра
1	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	413	398	416	413	387		413	417		-	408,14
1	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	2618,30	2618,30	2667,34	2628,11	2657,53		2628,11	2618,30		_	2633,71
2	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	376	371	363	373	374	360	375	375	359	362	368,80
	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	2304,50	2284,89	2314,31	2294,69	2343,72	2275,08	2324,11	2284,89	2265,27	2284,89	2297,64
3	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	_	343	344	352	336	336	349	335	344	351	343,33
3	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.		1980,89	2039,73	2039,73	2029,92	2039,73	2020,11	2000,50	2039,73	2010,31	2022,29
4	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	296	307	312	306	303	295	310	315	296	_	304,44
4	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	1745,54	1735,73	1774,95	1784,76	1745,54	1804,37	1755,34	1765,15	1774,95	_	1765,15
5	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	301	299	312	302	296	314	315	324	322	313	309,80
3	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	1676,89	1676,89	1686,70	1676,89	1706,31	1686,70	1725,92	1725,92	1725,92	1725,92	1701,41
6	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	287	283	279	293	272	260	263	273	266	279	275,50
U	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	1480,76	1529,80	1500,38	1490,57	1500,38	1470,96	1490,57	1500,38	1500,38	1480,76	1494,49
7	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	235	221	254	247	249	244	266	270	243	249	247,80
/	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	1294,44	1314,05	1323,86	1274,83	1314,05	1304,25	1314,05	1294,44	1284,64	1284,64	1300,33
8	$Q_{\rm B}$, ${ m M}^3/{ m c}$	224	_	226	226	224	225	_	224	225	225	224,88
0	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	1078,70	_	1049,28	1068,90	1068,90	1078,70	_	1068,90	1059,09	1049,28	1065,22
9	$Q_{\rm B}$, ${ m M}^3/{ m c}$	191	207	206	198	197	198	196	201	204	194	199,20
7	$h_{\rm B}$, мм рт. ст.	882,57	872,77	862,96	882,57	872,77	862,96	862,96	853,16	853,16	862,96	866,88

Примечание.

Замеры: № $1-n_{\text{вент},1}=375$ об/мин; № $2-n_{\text{вент},2}=350$ об/мин; № $3-n_{\text{вент},3}=325$ об/мин; № $4-n_{\text{вент},4}=300$ об/мин; № 5 (нормальный режим работы) $-n_{\text{вент},5}=295$ об/мин; № $6-n_{\text{вент},6}=275$ об/мин; № $7-n_{\text{вент},7}=250$ об/мин; № $8-n_{\text{вент},8}=225$ об/мин; № $9-n_{\text{вент},9}=200$ об/мин

Таблица 2.7 – Значения давления, развиваемого ГВУ, и ее производительности во время проведения зимнего и летнего экспериментов (при изменении производительности ГВУ)

	Производи	ительность	Разность	Давление, ра	азвиваемое	Разность
$N_{\underline{0}}$	ГВУ, С	$Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	между	Γ ВУ, h	ı _в , Па	между
Π/Π	летний	зимний	значениями	летний	зимний	значениями
	эксперимент	эксперимент	$\Delta Q_{\rm B}$, ${\rm M}^3/{\rm c}$	эксперимент	эксперимент	$\Delta h_{\rm B}$, Πα
1	408,14	405,2	2,94	2633,71	2712,52	-78,81
2	368,8	377,8	-9,0	2297,64	2393,8	-96,16
3	343,33	351,4	-8,07	2022,29	2098,62	-76,33
4	304,44	325,2	-20,76	1765,15	1800,5	-35,35
5	309,8	321,9	-12,1	1701,41	1722,05	-20,64
6	275,5	296,6	-21,1	1494,49	1525,92	-31,43
7	247,8	269,5	-21,7	1300,33	1260,16	40,17
8	224,88	242,4	-17,52	1065,22	1038,52	26,7
9	199,2	220,8	-21,6	866,88	833,57	33,31
Σ	2681,89	2810,8	-128,91	15147,12	15385,66	-238,54
Σ/n	297,99	312,31	-14,32	1683,01	1709,52	-26,50

Примечание.

Скорость вращения рабочего колеса вентилятора ГВУ: № $1-n_{\text{вент},1}=375$ об/мин; № $2-n_{\text{вент},2}=350$ об/мин; № $3-n_{\text{вент},3}=325$ об/мин; № $4-n_{\text{вент},4}=300$ об/мин; № 5 (нормальный режим работы) $-n_{\text{вент},5}=295$ об/мин; № $6-n_{\text{вент},6}=275$ об/мин; № $7-n_{\text{вент},7}=250$ об/мин; № $8-n_{\text{вент},8}=225$ об/мин; № $9-n_{\text{вент},9}=200$ об/мин.

По мере снижения скорости вращения рабочего колеса вентилятора ГВУ разность между значениями производительности $Q_{\rm B}$ при зимнем и летнем экспериментах увеличилась: при скорости вращения $n_{\rm Beht}=200$ об/мин (строка 9) она составила почти 11 %. Разность в значениях давлений, развиваемых ГВУ, в процентном соотношении изменялась незначительно. Однако при снижении скорости вращения рабочего колеса вентилятора ГВУ до $n_{\rm Beht}=250$ об/мин (строка 7) $h_{\rm B(дето)}$ стало больше, чем $h_{\rm B(зима)}$. Так продолжалось вплоть до снижения скорости до минимальной — $n_{\rm Beht}=200$ об/мин (строка 9).

Анализ отношения суммарных (строка Σ) и средних (Σ/n) значений показывает, что значение давления, развиваемого ГВУ, во время зимнего и летнего экспериментов отличаются менее, чем на 2 %. При этом производительность ГВУ при летнем и зимнем экспериментах ($\Delta Q_{\rm B}$) отличается не более чем на 9 %. Ввиду того что затраченное на проведение каждого эксперимента время составило около 20 минут, можно с уверенностью утверждать, что общерудничная естественная тяга, действующая в период эксперимента, не могла измениться существенно. В связи с тем что при изменении режимов работы ГВУ ее производительность $Q_{\rm B}$ и развиваемое давление $h_{\rm B}$ изменялись по нелинейному закону, на проветривание дополнительно действовали какие-то другие факторы.

Кроме того, температура и атмосферное давление подаваемого в воздухоподающие стволы воздуха в период проведения зимнего и летнего экспериментов отличаются довольно существенно, т.е. общерудничная естественная тяга, действующая между стволами в тот период, должна отличаться значительно. Однако этого не наблюдается. В результате чего можно сделать вывод, что на воздухораспределение между стволами оказывают влияние какие-либо другие (другой) факторы (фактор).

2.3. Теоретические основы управления режимом работы ГВУ с учетом действия случайных возмущающих факторов

Существующие в настоящее время методы определения величины общерудничной (общешахтной) естественной тяги (h_e) позволяют найти ее текущее значение при известных параметрах воздуха (наружного и шахтного). Однако управлять работой ГВУ с учетом ее действия проблематично ввиду инерционности процесса проветривания. Быстрое изменение производительности ГВУ в зависимости от объема воздуха поступающего в шахту (рудник) становится сложным по той же самой причине. А именно: с момента изменения режима работы ГВУ неизбежно пройдет время до того момента, когда в воздухоподающие стволы не начнет поступать воздух в объеме, определяемом развиваемым ГВУ статическим давлением, но при этом объем поступающего в рудник воздуха не будет определяться только режимом работы ГВУ.

При осуществлении воздухоподготовки процесс управления усложняется многократно. Связано это с тем, что при изменении режимов работы ШКУ

и/или СКВ в воздухоподающие стволы поступает воздух не только с переменным объемом, но также с переменными значениями температуры и давления. В этом случае при изменении производительности ГВУ объемный расход воздуха, поступающего в воздухоподающие стволы, изменится через достаточно значительный интервал времени. При этом необходимо будет изменять режим работы системы воздухоподготовки, в результате чего изменится значение как общерудничной (общешахтной) естественной тяги, так и естественных тяг, действующих между каждой из пар сообщающихся стволов [13]. В результате этого процесса режим работы ГВУ придется изменять в зависимости от вновь возникающих факторов. При таком подходе к системе управления процесс проветривания будет разбалансированным и, следовательно, низкоэффективным.

Заранее определить объемный расход воздуха в стволах можно, если получится спрогнозировать значение общерудничной (общешахтной) естественной тяги и задать с учетом ее действия режим работы ГВУ. Предварительный прогноз позволяет определить значения естественных тяг, оказывающих влияние на объем поступающего в стволы воздуха, и установить требуемый режим проветривания. Это позволит обеспечить выполнение правил безопасности (подачу требуемого объемного расхода воздуха) при условиях работы ГВУ в энергосберегающем режиме.

В период использования систем воздухоподготовки заблаговременная установка требуемого режима работы ШКУ или СКВ также позволит снизить затраты энергоресурсов, используемых для нагрева (при работе ШКУ) или охлаждения (при работе СКВ), в зависимости от объема поступающего в них воздуха.

2.3.1. Методика расчета величины и направления общерудничной естественной тяги с заданной доверительной вероятностью

В момент, когда между стволами общерудничная естественная тяга не действует ($h_e=0$), режим проветривания описывается уравнением [4, 15, 17 и др.]:

$$h_{\text{M.T.}} = R_{\text{DVI}} Q_{\text{DVII}}^2, \tag{2.5}$$

где $h_{\text{и.т.}}$ — давление, развиваемое источниками тяги на подземном горнодобывающем предприятии, Па; $R_{\text{руд}}$ — аэродинамическое сопротивление рудника (шахты), (H·c²)/м⁸; $Q_{\text{руд}}$ — объемный расход воздуха, поступающего в рудник (шахту), м³/с.

В случае, когда на подземном горнодобывающем предприятии в качестве источника тяги используется одна поверхностная ГВУ (как на большинстве рудников и шахт), параметр в формуле (2.5) $h_{\text{и.т.}}$ можно заменить на значение статического давления (общешахтной депрессии), развиваемого указанной установкой ($h_{\rm B}$), а $Q_{\rm руд}$ – на значение производительности вентилятора ГВУ ($Q_{\rm B}$).

Для получения совокупности опытных значений производительности ГВУ $Q_{\mathrm{B},i}$ выполняются следующие измерения.

При помощи расходомера (датчика расхода воздуха) в диффузорном канале ГВУ (рис. 2.2) измеряются n-значения скорости ($v_{\text{вент},i}$) движения воздуха ($i=1,\,2,\,...,\,n_{\text{изм}}$) при различных режимах работы ГВУ, которые изменяются либо при помощи варьирования угла установки лопаток направляющего аппарата, либо при изменении скорости вращения рабочего колеса вентилятора. Тогда объемный расход воздуха равен

$$Q_{\mathrm{B},i} = v_{\mathrm{Beht},i} \cdot S_{\mathrm{H}}, (i = 1, 2, ..., n_{\mathrm{H3M}}),$$
 (2.6)

где $S_{\rm H}$ — сечение нагнетательного канала (канала ГВУ).

Для каждого из значений производительности $Q_{B,i}$ находится соответствующее значение статического давления ГВУ $h_{B,i}$, $(i=1,\,2,\,...,\,n_{\text{изм}})$ по формуле

$$h_{\mathrm{B},i} = R_{\mathrm{pyg}} \cdot Q_{\mathrm{B},i}^2. \tag{2.7}$$

В результате получаем две совокупности опытных значений (выборки) производительности ГВУ и соответствующих им значений статического давления (общешахтной депрессии) двух величин $Q_{\rm B}$ и $h_{\rm B}$: $(Q_{\rm B,1}, ..., Q_{\rm B,n})$ и $(h_{\rm B,1}, ..., h_{\rm B,n})$, которые будем считать случайными.

Уравнение (2.7) справедливо только в случае, когда общерудничная (общешахтная) естественная тяга равна нулю ($h_e = 0$). Когда $h_e \neq 0$, зависимость статического давления h_B от естественной тяги h_e и аэродинамического сопротивления рудника (шахты) $R_{\rm руд}$ следует искать в форме уравнения регрессии [13, 159, 223]:

$$h_{\scriptscriptstyle \rm R} = h_{\scriptscriptstyle \rm e} + R_{\scriptscriptstyle \rm DVJ} \cdot Q_{\scriptscriptstyle \rm R}^2, \tag{2.8}$$

где обе величины — $h_{\rm e}$ и $R_{\rm pyg}$ — подлежат одновременному определению на основании опытных данных, т.е. совокупности опытных значений $Q_{{\rm B},i}^2$ и соответствующих значений $h_{{\rm B},i}$, $(i=1,2,...,n_{{\rm H3M}})$.

В координатах $Q_{\mathrm{B},i}^2 - h_{\mathrm{B}}$ уравнение регрессии (2.8) представляет собой прямую линию.

Для построения уравнения регрессии (2.8) необходимо выполнить несколько этапов следующих вычислений.

Представим, что величины $Q_{\rm B}^2$ и $h_{\rm B}$ представлены выборочными совокупностями $(Q_{\rm B,1}^2,Q_{\rm B,2}^2,...,Q_{\rm B,n}^2)$ и $(h_{\rm B,1},\ h_{\rm B,2},...,\ h_{\rm B,n})$ своих опытных значений. Оценка коэффициента корреляции $r_{Q_{\rm B}^2h_{\rm B}}^{\rm on}$ величин $Q_{\rm B}^2$ и $h_{\rm B}$ выполняется по формуле [205, 211, 212]:

$$r_{\underline{Q_{\mathrm{B}}^{2}h_{\mathrm{B}}}}^{\mathrm{out}} = \frac{\overline{Q_{\mathrm{B}}^{2}h_{\mathrm{B}}} - \overline{Q_{\mathrm{B}}^{2}h_{\mathrm{B}}}}{\sqrt{\left(\overline{Q_{\mathrm{B}}^{4}}\right) - \left(\overline{Q_{\mathrm{B}}^{2}}\right)^{2}\left(\overline{h_{\mathrm{B}}^{2}}\right) - \left(\overline{h_{\mathrm{B}}}\right)^{2}}}.$$
(2.9)

Как известно, черта над каждой из переменных означает ее среднее значение, вычисляемое по опытным данным. Значимость полученного значения $r_{Q_{\rm B}^2h_{\rm cr}}^{\rm on}$ проверяется с помощью t-критерия Стьюдента, опытные значения которого вычисляют по формуле [205, 211, 212]:

$$t_r^{\text{off}} = \sqrt{\frac{\left(n_{_{\text{HSM}}} - 2\right)\left(r_{Q_{\text{B}}^2 h_{\text{B}}}^{\text{off}}\right)^2}{1 - \left(r_{Q_{\text{B}}^2 h_{\text{B}}}^{\text{off}}\right)^2}} \,. \tag{2.10}$$

При заданном уровне значимости α полученные опытные значения t-критерия Стьюдента сравнивают их с критическим (табличным) значением $t_{\alpha}^{\text{кp}} = t(\alpha, n-2)$. Обычно значения уровня значимости принимают равным $\alpha = 0.01$; $\alpha = 0.05$ или $\alpha = 0.1$. При $t_r^{\text{оп}} > t_{\alpha}^{\text{кp}}$ коэффициент корреляции $r_{Q_B^2 h_B}^{\text{оп}}$ считается значимым. Тогда параметры h_e и $R_{\text{руд}}$ уравнения (2.8) можно найти из системы уравнений:

$$\begin{cases}
\sum_{i=1}^{n} h_{B,i} - R_{\text{руд}} \sum_{i=1}^{n} Q_{B,i}^{2} - h_{e} n_{\text{изм}} = 0 \\
\sum_{i=1}^{n} h_{B,i} Q_{B,i}^{2} - R_{\text{руд}} \sum_{i=1}^{n} Q_{B,i}^{4} - h_{e} \sum_{i=1}^{n} Q_{B,i}^{2} = 0
\end{cases} (2.11)$$

при решении которой значения $R_{\text{руд}}$ и h_{e} будут вычисляться из уравнений:

$$R_{\text{руд}} = \frac{\overline{Q_{\text{B}}^2 h_{\text{B}}} - \overline{Q_{\text{B}}^2} \overline{h_{\text{B}}}}{\overline{Q_{\text{B}}^4} - (\overline{Q_{\text{B}}^2})^2}, \ h_{\text{e}} = \overline{h_{\text{B}}} - R_{\text{руд}} \overline{Q_{\text{B}}^2}. \tag{2.12}$$

Полученные по формулам (2.12) значения подставляются в выражение (2.8), в результате чего получаем искомое уравнение регрессии.

Но в случае отсутствия общерудничной (общешахтной) естественной тяги, т.е. при $h_{\rm e}=0$, расчет аэродинамического сопротивления рудника необходимо выполнять по формуле

$$R_{\rm pyg}^* = \frac{\overline{Q_{\rm B}^2 h_{\rm B}}}{\overline{Q_{\rm B}^4}}.$$
 (2.13)

Здесь $R_{\rm руд}^*$ – аэродинамическое сопротивление рудника (шахты) без учета действия $h_{\rm e},$ (H·c²)/м8, т.е. при $h_{\rm e}=0.$

Тогда полученное значение $R_{\text{руд}}^*$ подставляется в выражение (2.7). В итоге получаем два значения статического давления ГВУ.

Найденное среднее значение $\overline{h_{\!\scriptscriptstyle B}}$ без учета действия общерудничной естественной тяги

$$\overline{h_{\rm B}^{(h_{\rm B})}} = R_{\rm pyg}^* \left(\overline{Q_{\rm B}}\right)^2 \tag{2.14}$$

и с ее учтом

$$\overline{h_{\rm B}^{(h_{\rm B}+h_{\rm e})}} = h_{\rm e} + R_{\rm pyg} \left(\overline{Q_{\rm B}}\right)^2.$$
 (2.15)

Теперь необходимо определить, какому из полученных расчетных значений $\overline{h}_{\rm B}$ близки измеренные значения $h_{\rm B,i}$. В этом случае, если измеренные значения $h_{\rm B,i}$ имеют большее число совпадений с величиной $\overline{h}_{\rm B}^{(h_{\rm B})}$, то считается, что в период измерений общерудничная естественная тяга не действовала. Если измеренные значения $h_{\rm B,i}$ имеют большее число совпадений со значением $\overline{h}_{\rm B}^{(h_{\rm B}+h_{\rm e})}$, то общерудничная естественная тяга действовала в период проведения измерений, и ее необходимо искать по формуле (2.12).

Для того чтобы определить, какое из расчетных значений $\overline{h_{\rm B}}$ близко к измеренным, необходимо найти среднеквадратичные отклонения для этих значений по следующим формулам:

$$S_{h_{\rm B}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left[\frac{\left(\overline{h_{\rm B}}\right)_{i} - R_{\rm py,I}^{*} \left(\overline{Q_{\rm B}}\right)_{i}^{2}}{\left(\overline{h_{\rm B}}\right)_{i}} \right]^{2}}$$

$$n_{\rm \tiny HSM}^{\rm cpe,I}$$
(2.16)

$$S_{(h_{\rm B}+h_{\rm e})} = \sqrt{\frac{\displaystyle\sum_{i=1}^{n} \left[\frac{\left(\overline{h_{\rm B}}\right)_{i} - \left(h_{\rm e} + R_{\rm pyg} \left(\overline{Q_{\rm B}}\right)_{i}^{2}\right)^{2}}{\left(\overline{h_{\rm B}}\right)_{i}}}$$

$$(2.17)$$

$$n_{\rm \tiny H3M}^{\rm cpeg}$$

где $n_{\text{изм}}^{\text{сред}}$ — количество измерений при разной скорости вращения рабочего колеса вентилятора.

В случае, если $S_{h_{\rm B}} \neq S_{h_{\rm B}+h_{\rm e}}$, то можно говорить, что среднеквадратичные отклонения неоднородны, т.е. они отличаются друг от друга. При $S_{h_{\rm B}} < S_{h_{\rm B}+h_{\rm e}}$ значения уравнения (2.14) имеют большее число совпадений с эмпирическими данными $h_{{\rm B},i}$, т.е. значение общерудничной естественной тяги можно принять равным 0, а за аэродинамическое сопротивление рудника принять значение $R_{\rm pyg}^*$. В противном случае ($S_{h_{\rm B}} > S_{h_{\rm B}+h_{\rm e}}$) принимается за верное уравнение (2.15), т.е. утверждение, что общерудничная естественная тяга действует, а $R_{\rm pyg} = \frac{\overline{Q_{\rm B}^2 h_{\rm B}} - \overline{Q_{\rm B}^2}}{\overline{Q_{\rm B}^4} - \left(\overline{Q_{\rm B}^2}\right)^2}$.

Для того чтобы определить, насколько значимо отличаются друг от друга полученные среднеквадратичные отклонения $S_{h_{\rm B}}$ и $S_{h_{\rm B}+h_{\rm e}}$, необходимо выполнить оценку их однородности с помощью F-критерия Фишера по формуле (2.4).

Для этого опытное значение F^{on} сравнивается с критическим значением $F^{\text{крит}}(\alpha; k_1; k_2)$, которое определяется по табличным значениям в зависимости от уровня значимости α и степеней свободы k_1 и k_2 .

При выполнении условия $F^{\circ n} < F^{\kappa p \mu \tau}(\alpha; k_1; k_2)$ дисперсии считаются однородными. Это указывает на то, что в период проведения измерений общерудничная естественная тяга не оказывала на процесс проветривания существенного влияния.

При проверке условия $F^{\text{on}} > F^{\text{крит}}(\alpha; k_1; k_2)$, если опытное значение критерия Фишера будет больше критического, то дисперсии следует считать неоднородными, т.е. отличными друг от друга. В этом случае, если $S_{h_{\text{B}}} > S_{h_{\text{B}} + h_{\text{e}}}$, принимаем условие, что общерудничная естественная тяга в момент измерений действовала между стволами, а при выполнении неравенства $S_{h_{\text{B}}} < S_{h_{\text{B}} + h_{\text{e}}}$, что она отсутствовала или ее значение было настолько мало, что им можно пренебречь.

В последнем случае необходимо определить, насколько общерудничная естественная тяга, действующая в период измерений, оказывала влияние на процесс проветривания. Для этого необходимо выполнить следующие процедуры:

- проверить значимость найденных параметров $h_{\rm e}$ и $R_{
 m pyg}$;
- уточнить адекватность уравнения (2.15) опытным (измеренным) данным (проверку его значимости в целом);
 - оценить точность полученного уравнения.

Сама по себе оценка значимости величины $h_{\rm e}$ свидетельствует о существенном или несущественном влиянии общерудничной (общешахтной) естественной тяги на процесс проветривания. При этом естественно, что аэродинамическое сопротивление рудника (шахты) $R_{\rm pyg}$ не может быть нулевым.

Проверка значимости вычисленного значения $h_{\rm e}$ также выполняется с помощью t-статистики Стьюдента. Для этого опытное значение $t_{h_{\rm e}}^{\rm on}$ вычисляется через стандартную ошибку $m_{h_{\rm e}}$ параметра $h_{\rm e}$ по формулам [205, 211, 212, 230]:

$$t_{h_{e}}^{\text{off}} = \frac{h_{e}}{m_{h_{e}}}, \qquad m_{h_{e}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (h_{\text{B},i} - R_{\text{pyd}} Q_{\text{B},i}^{2} - h_{e})^{2}}{(n_{\text{\tiny H3M}} - 2) n_{\text{\tiny H3M}}} \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_{\text{B},i}^{4}}{\sum_{i=1}^{n} (Q_{\text{B},i}^{2} - Q_{\text{B},i}^{2})^{2}}.$$
 (2.18)

Когда вычисленное значение $t_{h_{\rm e}}^{\rm on}$ критерия Стьюдента больше его критического (табличного) значения $t_{\alpha}^{\rm kp}=t(\alpha,\,n_{\rm \scriptscriptstyle H3M}-2)$:

$$t_{h_c}^{\text{off}} > t_{\alpha}^{\text{kp}}, \qquad (2.19)$$

свободный член h_e уравнения регрессии (2.15) считается значимым, а его значения с доверительной вероятностью $p = 1 - \alpha$ будут лежать в интервале:

$$h_{\rm e} \in (h_{\rm e} - m_{h_e} \cdot t_{\alpha}^{\kappa p}; h_{\rm e} + m_{h_e} \cdot t_{\alpha}^{\kappa p}).$$
 (2.20)

По границам доверительного интервала (2.20) можно выяснить знак (направление действия) общерудничной (общешахтной) естественной тяги $h_{\rm e}$. Если границы интервала положительны, то с вероятностью $p=1-\alpha$ естественная тяга будет являться отрицательной, т.е. препятствовать проветриванию [13, 230]. Отрицательное значение границ доверительного интервала (2.20) будет свидетельствовать о том, что действующая в момент измерений общерудничная (общешахтная) естественная тяга $h_{\rm e}$ с вероятностью $p=1-\alpha$ будет являться положительной, т.е будет способствовать проветриванию рудника (шахты) [13, 230]. В последнем случае можно изменить режим работы ГВУ на более экономичный путем перевода рабочей области вентилятора в область более низких давлений, сохраняя при этом подачу воздуха в требуемом объеме, но при снижении затрат электроэнергии на проветривание.

Дополнительно для проверки достоверности полученных результатов и их адекватности опытным данным рекомендуется выполнить проверку значимости уравнения регрессии (2.15) в целом с помощью F-критерия Фишера, опытное значение $F^{\circ \Pi}$ которого вычисляется по формуле

$$F^{\text{off}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (h_{\text{B},i}^{-} - R_{\text{руд}} Q_{\text{B},i}^{2} - h_{\text{e}})^{2}}{1} \frac{n_{\text{\tiny HSM}} - 2}{\sum_{i=1}^{n} (h_{\text{B},i} - R_{\text{\tiny руд}} Q_{\text{B},i}^{2} - h_{\text{e}})^{2}}.$$
 (2.21)

Если полученное $F^{\text{on}} > F_{\alpha}^{\text{крит}}$, то с вероятностью $p = 1 - \alpha$ уравнение (2.12) адекватно описывает измеренные (опытные) данные. В этом случае для выбора режима работы ГВУ с целью управления процессом проветривания рудника можно использовать найденные значения $h_{\rm e}$ и $R_{\rm руд}$.

В случае, если $F^{\text{оп}} < F_{\alpha}^{\text{крит}}$, то с вероятностью $p = 1 - \alpha$ уравнение (2.12) описывает опытные данные некорректно. Поэтому необходимо произвести перерасчет коэффициентов $h_{\text{е}}$ и $R_{\text{руд}}$ или произвести проверку на наличие ложных данных в исходных измеренных значениях.

Точность уравнения регрессии (2.15) в некоторой точке $Q_{\rm B}^2$ можно оценить при помощи средней стандартной ошибки $m_{h_{\rm B}}$ теоретического значения статического давления, найденного из уравнения (2.15) по формуле:

$$m_{h_{\rm B}} = \frac{1}{\sqrt{n_{_{\rm HSM}} - 2}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (h_{{\rm B},i} - R_{{\rm pyg}}Q_{{\rm B},i}^{2} - h_{\rm e})^{2}} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n_{_{\rm HSM}}} + \frac{\left(Q_{\rm B}^{2} - \overline{Q_{\rm B}^{2}}\right)^{2}}{\sum_{i=1}^{n_{_{\rm HSM}}} \left(Q_{{\rm B},i}^{2} - \overline{Q_{\rm B}^{2}}\right)^{2}}} . \quad (2.22)$$

Тогда с вероятностью $p=1-\alpha$ значение статического давления $h_{\rm B}$ в точке $Q_{\rm B}^2$ будет лежать в доверительном интервале

$$h_{\rm B} \in (R_{\rm pyg} Q_{\rm B}^2 + h_{\rm e} - m_{h_{\rm B}}; R_{\rm pyg} Q_{\rm B}^2 + h_{\rm e} + m_{h_{\rm B}}).$$
 (2.23)

Доверительный интервал (2.19) указывает точность полученного значения $h_{\rm B}$.

2.3.2. Управление проветриванием с учетом инерционности системы

Для наглядного описания предлагаемого метода определения значения параметров $h_{\rm e}$ и $R_{\rm руд}$, рассмотрены несколько серий экспериментов (на теоретических данных).

Как было описано ранее, если обе границы интервала (2.17) будут иметь знак «—», то значение общерудничной естественной тяги принимается отрицательным, т.е. направления действия общерудничной (общешахтной) естественной тяги и ГВУ будут совпадать. Знак «+» на обеих границах интервала будет указывать на то, что значение тяги положительно. Это свидетельствует о том, что направления действия общерудничной (общешахтной) естественной тяги и ГВУ будут противоположными, т.е. тяга будет препятствовать поступлению воздуха в рудник (шахту).

Изначально полагаем, что приведенные во всех сериях данные проверены на «ложность» по описанной в п. 2.2.1 методике.

Первая серия данных, взятых условно, т.е. только для описания работоспособности методики, приведена в таблице 2.6. Все расчеты выполнялись при уровне значимости $\alpha = 0.05$.

Таблица 2.6 — Значения статического давления $h_{\rm B}$, развиваемого ГВУ в зависимости от ее производительности $Q_{\rm B}$

$Q_{\rm B}$, ${ m M}^3/{ m c}$	219,9	230,1	264,3	282,1	299,5	312,6	330,5	367,1
$h_{\rm B},\Pi{\rm a}$	1992,11	2241,62	2770,53	3340,14	3751,55	4126,36	4270,41	5653,18

Значения аэродинамического сопротивления рудника для указанной в таблице 2.6 серии эксперимента, найденные по формулам (2.12) и (2.13), соответственно равны $R_{\rm руд}=0.041261~({\rm H\cdot c^2})/{\rm m^8}$ и $R_{\rm руд}^*=0.041260~({\rm H\cdot c^2})/{\rm m^8}$, т.е. на первый взгляд они практически не отличаются друг от друга. Расчетное значение общерудничной (общешахтной) естественной тяги $h_{\rm e}=0.065~{\rm \Pi a}$ также близко к 0.

Для проверки гипотезы о том, что статическое давление ГВУ с учетом действия тяги, найденное по формуле (2.15) и без ее учета (формула (2.14)), не отличаются, сравниваются среднеквадратичные отклонения $S_{\scriptscriptstyle h_{\scriptscriptstyle B}}$ и $S_{\scriptscriptstyle h_{\scriptscriptstyle B}+h_{\scriptscriptstyle c}}$ этих величин. Они имеют практически равное значение $S_{h_{\rm R}}=0.028731$ и $S_{h_{\rm R}+h_{\rm c}}$ 0,028730, что указывает близость полученных значений. на В этом случае справедлива гипотеза, что в момент измерений значением общерудничной естественной тяги можно пренебречь ($h_e = 0$), а за аэродинасопротивление принять любое мическое рудника ИЗ значений: $R_{
m pyg} = 0.041261 \; ({
m H\cdot c^2})/{
m M^8}$ или $R_{
m pyg}^* = 0.041260 \; ({
m H\cdot c^2})/{
m M^8}.$

Данные второй серии эксперимента приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7 — Значения статического давления $h_{\rm B}$, развиваемого ГВУ в зависимости от ее производительности $Q_{\rm B}$

$Q_{\rm B}$, ${ m M}^3/{ m c}$	219,9	230,1	264,3	282,1	299,5	312,6	330,5	367,1
$h_{\rm B}$, Па	1992,11	2241,62	2770,53	3340,14	3751,55	4126,36	4296,87	5449,18

В ходе расчетов найденное значение общерудничной естественной тяги составило $h_{\rm e}$:= 115,196 Па, т.е. на первый взгляд приняло значимое значение. Полученные по формулам (2.12) и (2.13) значения аэродинамического сопротивления рудника для указанной в таблице 2.7 серии эксперимента соответственно равны $R_{\rm руд}$ = 0,039649 и $R_{\rm руд}^*$ = 0,040876 (H·c²)/м8.

Значения среднеквадратичных отклонений, найденных для приведенной серии экспериментов, имеют следующие значения $S_{h_{\rm B}}=0.027513$ и $S_{h_{\rm B}+h_{\rm c}}=0.026111$, т.е. отличаются друг от друга. Однако при оценке их однородности с помощью F-критерия Фишера выяснилось, что их отличие незначительное: $F^{\rm oll}=1.11<3.79=F^{\rm Kput}(0.05;7,7)$.

В этом случае можно сделать вывод, что общерудничная естественная тяга в момент измерений действовала, но при этом не оказывала на процесс проветривания существенного значения, так как среднеквадратичные отклонения $S_{h_{\rm B}}$ и $S_{h_{\rm B}+h_{\rm e}}$ однородны. Поэтому при регулировании работы ГВУ влиянием общерудничной естественной тяги можно пренебречь.

Далее по вышеописанной методике находим значения общерудничной (общешахтной) естественной тяги и аэродинамического сопротивления рудника для третьей серии измерений (таблица 2.8).

Первоначально находятся значения $R_{\rm pyg}^* = 0.053507~({\rm H\cdot c^2})/{\rm m^8}~{\rm u}$ $R_{\rm pyg} = 0.042579~({\rm H\cdot c^2})/{\rm m^8}$. Далее по методике (так же, как и в ранее приведенных примерах) проверяется, какие из полученных в ходе расчетов значения наиболее близки к данным эксперимента.

Среднеквадратичные отклонения соответственно равны $S_{h_{\rm B}}=0.079073$ и $S_{h_{\rm B}+h_{\rm e}}=0.025826$. Опытное значение $F^{\rm on}=9.38$ для сравниваемых среднеквадратичных отклонений, т.е. $F^{\rm on}=9.38>3.79=F^{\rm крит}(0.05;7;7)$. Это указывает на отличие двух полученных значений расчетных данных. Ввиду того, что меньшая из

среднеквадратичных отклонений является $S_{h_{\rm B}+h_{\rm c}}=0,025826$, принимается гипотеза, что в момент эксперимента между стволами рудника (шахты) действовала общерудничная естественная тяга, а значение аэродинамического сопротивления рудника, найденное по формуле (2.12), равно $R_{\rm pyg}=0,042579~({\rm H\cdot c^2})/{\rm m^8}.$

Таблица 2.8 — Значения статического давления $h_{\rm B}$, развиваемого ГВУ в зависимости от ее производительности $Q_{\rm B}$

$Q_{\rm B}$, ${ m M}^3/{ m c}$	219,9	230,1	264,3	282,1	299,5	312,6	330,5	367,1
$h_{ m B},$ Па	2994,25	3151,88	4121,52	4511,23	4942,14	5128,58	5791,27	6611,91

При оценке общерудничной естественной тяги получено следующее значение $h_{\rm e}=1025,\!98$ Па. При том же уровне значимости $\alpha=0,\!05$ получаем доверительный интервал:

$$h_e \in (1025,98 - 149,12 \cdot 2,45; 1025,98 + 149,12 \cdot 2,45) \equiv (660,64; 1391,32), \Pi a.$$

Обе границы доверительного интервала положительны. Это указывает на то, что для серии измерений, приведенных в таблице 2.3, естественная тяга $h_{\rm e}$ будет отрицательной, т.е. будет препятствовать поступлению воздуха в рудник (шахту). В этом случае развиваемое ГВУ давление необходимо повысить минимум на величину $\Delta h_{\rm e} = 1391,32~\Pi a$, т.е. до полной компенсации влияния противодействующей общерудничной (общешахтной) естественной тяги.

Четвертая серия теоретических данных представлена в таблице 2.9. Таблица 2.9 — Значения статического давления $h_{\rm B}$, развиваемого ГВУ в зависимости от ее производительности $Q_{\rm B}$

$Q_{\rm B}$, ${ m M}^3/{ m c}$	219,9	230,1	264,3	282,1	299,5	312,6	330,5	367,1
h_{B} , Па	1193,52	1454,73	2121,54	2381,15	2792,56	3191,47	3771,87	4822,48

Найденные значения аэродинамического сопротивления рудника для четвертой серии экспериментов равны $R_{\rm руд}=0.032739~({\rm H\cdot c^2})/{\rm m^8},$ а $R_{\rm руд}^*=0.041502~({\rm H\cdot c^2})/{\rm m^8}.$

Среднеквадратичные отклонения полученных величин соответственно равны $S_{h_{\rm R}}=0.146130$ и $S_{h_{\rm R}+h_{\rm c}}=0.030199.$

Опытное значение для сравниваемых среднеквадратичных отклонений $F^{\text{on}}=23,42>3,79=F^{\text{крит}}(0,05;\,7;\,7)$, что указывает на отличие двух полученных значений расчетных данных. Ввиду того, что меньшая из среднеквадратичных отклонений является $S_{h_{\text{B}}+h_{\text{c}}}=0,030199$, принимается гипотеза, что в момент эксперимента между стволами рудника (шахты) действовала общерудничная естественная тяга, а значение $R_{\text{руд}}=0,032739~(\text{H}\cdot\text{c}^2)/\text{M}^8$.

Принимаем следующие оценки искомых значений: общерудничная (общешахтная) естественная тяга $h_{\rm e} = -822,63$ Па, аэродинамическое сопротивление рудника $R_{\rm руд} = 0,032739$ (H·c²)/м⁸. Соответствующий доверительный интервал равен:

$$h_e \in (-822,63 - 92,93 \cdot 2,45; -822,55 + 92,93 \cdot 2,45) \equiv (-1050,31; -594,95), \Pi a.$$

Обе границы доверительного интервала отрицательны. В этом случае с вероятностью 95 % для приведенного примера общерудничная (общешахтная) естественная тяга h_e является положительной, т.е. способствующей поступлению воздуха в рудник (шахту).

В этом случае производительность ГВУ в целях экономии электроэнергии можно снизить на величину $\Delta h_{\rm e} = 594,95~\Pi {\rm a},$ т.е. до верхней границы доверительного интервала.

При регулировании производительности ГВУ ориентироваться на среднее значение доверительного интервала (на значение $h_{\rm e}=822,63$ Па) не рекомендуется, поскольку общерудничная (общешахтная) естественная тяга $h_{\rm e}$ с вероятностью 95 % может принимать любое значение в границах доверительного интервала. В случае изменения давления, развиваемого ГВУ, на величину $\Delta h_{\rm e}=822,63$ Па, объемный расход поступающего в рудник воздуха может оказаться недостаточным для обеспечения безопасных условий проветривания. Ситуация может оказаться хуже, если производительность ГВУ будет снижена на величину $h_{\rm e}=1050,31$ Па, т.е. нижней границы доверительного интервала. Поэтому

при регулировании режима работы ГВУ необходимо снижать значение развиваемого ею давления ($h_{\rm B}$) на величину, не превышающую значение верхней границы доверительного интервала (2.23).

Также, изменяя уровень значимости α, можно варьировать границы доверительного интервала. В некоторых случаях необходимо предусмотреть подобную функцию для эффективного управления процессом проветривания.

В таблице 2.10 приведены примеры расчета границ доверительных интервалов для значения общерудничной (общешахтной) естественной тяги h_e при различных уровнях значимости на примере данных таблицы 2.8.

При оценке полученных данных видно, что при увеличении уровня значимости α приращение по интервалу уменьшается. Однако уменьшается и вероятность, с которой эти границы принимаются ($p = 1 - \alpha$). Следовательно, шанс совершения ошибки первого рода увеличивается.

Таблица 2.10 — Примеры расчета границ доверительных интервалов для значения общерудничной (общешахтной) естественной тяги $h_{\rm e}$ при различных уровнях значимости

Уровень	Значение общерудничной (общешахтной) естественной тяги h_{e_i} Па				
значимости α	нижняя граница	верхняя граница	приращение Δh_{e}		
0,01	472,96	1579,44	553,24		
0,05	660,64	1391,32	365,34		
0,1	736,91	1315,50	289,30		

Основным показателем в процессе проветривания для обеспечения безопасности и энергоэффективности является выбор уровня значимости α для оценки величины и направления общерудничной естественной тяги h_e с целью определения доверительного интервала, в котором необходимо производить регулирование режима работы ГВУ.

На приведенных примерах видно, что разработанная методика расчета общерудничной (общешахтной) естественной тяги позволяет выявить ее

наличие, а также определить направление с заданной доверительной вероятностью. В результате расчетов появляется возможность управлять работой ГВУ, внося оперативные изменения с целью обеспечения эффективного проветривания.

2.3.3. Обработка экспериментальных данных проведенных экспериментов

Для расчета величины общерудничной естественной тяги в работах [13, 17, 159] предложены формулы и порядок расчета. Вычислить величину и направление общерудничной естественной тяги по этим формулам можно при известных параметрах шахтных стволов рудника и параметрах наружного воздуха.

Интерес представляет проверка теоретических формул с опытными данными.

За исходные данные были приняты измеренные параметры воздуха в период с 2 часов 10 минут до 4 часов 10 минут (строки 10–14 таблицы 2.9). Указанный интервал времени выбран в связи с тем, что к этому моменту воздухораспределение стабилизировалось, т.е. процесс проветривания установился за счет общерудничной естественной тяги.

Опытные значения ($h_{\rm e}^{\rm on}$) для этого периода, найденные в ходе обработки измеренных параметров (таблица 2.1), и расчетные значения ($h_{\rm e}^{\rm pacq.}$) общерудничной естественной тяги, полученные по формуле гидростатического метода расчета [13, 17, 159], для того же периода измерений приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Значения общерудничной естественной тяги, найденные по результатам измерений и по известным математическим зависимостям

№ п/п	$\mathit{h}_{\scriptscriptstyle\mathrm{e}}^{\scriptscriptstyle\mathrm{off}}$, Па	$h_{ m e}^{ m pacч.}$, Па	Отклонение, %
1	-45,05	-41,89	7,0
2	-45,18	-42,31	6,4
3	-45,79	-42,67	6,8
4	-44,06	-41,72	5,3
5	-43,89	-41,10	6,4

Сравнение соответствующих опытных $h_{\rm e}^{\rm on}$ и расчетных $h_{\rm e}^{\rm pac-u}$ значений, приведенных во втором и третьем столбцах таблицы 2.13, показывает их достаточно хорошее совпадение (максимальное отклонение расчетных от опытных значений составляет 7 %).

Таким образом, формулы и порядок расчета, приведенные в работах [13, 17, 159], позволяют оценить величину общерудничной естественной тяги с достаточной точностью в том случае, если измерения (опытные данные) были выполнены при отключенной ГВУ.

Кроме того, очевидным становится вывод, что возникновение, а также изменение величины и направления общерудничной естественной тяги зависит от параметров воздуха. После остановки ГВУ за счет действия общерудничной естественной тяги изменилось сначала направление движения воздуха в стволах, а потом поддерживалась подача в них воздуха.

Но тогда встает вопрос о том, насколько эти же формулы позволяют искать значение общерудничной естественной тяги при включении ГВУ или при ее переходе на другой режим работы.

В таблице 2.12 приведены результаты расчетов общерудничной естественной тяги и аэродинамического сопротивления рудника по методике, описанной в п. 2.3.1.

Таблица 2.12 — Результаты расчетов общерудничной естественной тяги и аэродинамического сопротивления рудника

De over the operatory of overland to the	Параметр						
Время проведения эксперимента	$h_{\rm e}$, Па	$R_{\rm руд}$, $(\mathrm{H}\cdot\mathrm{c}^2)/\mathrm{M}^8$	$h_{\scriptscriptstyle m HИЖНЯЯ},\Pi$ а	$h_{\text{верхняя}}, \Pi a$			
Летний эксперимент ($h_{e(nero)}$)	406,1	0,01374	386,77	425,44			
Зимний эксперимент (($h_{e(зима)}$))	75,99	0,01686	66,80	85,18			

В результате расчетов установлено: на одном и том же руднике при изменении режимов работы ГВУ аналогичным образом значительно, более чем в 5 раз, отличаются значения общерудничной естественной тяги в летнем эксперименте ($h_{\rm e(neto)} = 406,1~\Pi a$) от соответствующих данных во время зимнего экспери-

мента ($h_{\text{e}(3има)} = 75,99$ Па). Также существенно отличаются значения аэродинамического сопротивления рудника — на 18,5 %. При этом анализ данных, приведенных в таблице 2.7, показал, что объемный расход воздуха, поступающего в рудник, и развиваемое ГВУ давление во время поведения зимнего и летнего экспериментов отличаются незначительно.

Согласно данным работ [159, 231], большая часть (около 80 %) аэродинамического сопротивления рудника приходится на шахтные стволы и на главные выработки, отходящие от них. Ввиду того, что разность во времени между экспериментами составляет менее года, можно утверждать, что за этот период значимых изменений параметров шахтных стволов и главных горных выработок рудника произойти не могло. Тогда при незначительном отличии значений $h_{\rm B}$ и $Q_{\rm B}$, а также с учетом значения $R_{\rm руд}$ согласно формулы (2.8) будет наблюдаться неравенство: $h_{\rm B} = h_{\rm e(лето)} + R_{\rm руд}Q_{\rm B}^2 \neq h_{\rm B} = h_{\rm e(зима)} + R_{\rm руд}Q_{\rm B}^2$.

Следовательно, в формуле (2.8) не учитываются какие-то другие факторы.

При известных значениях параметров воздуха при проведении летнего и зимнего экспериментов по формулам работ [13, 17, 159] было вычислено значение общерудничной естественной тяги. Согласно расчетам, эти значения составили: летом $h'_{\text{e(лето)}} = 431,23$ Па, зимой $-h'_{\text{e(зима)}} = 143,20$ Па.

В этом случае отличие значений общерудничной естественной тяги, полученных при летнем эксперименте, от расчетного значения составляет 5,8 %, а при зимнем – почти в 2 раза.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что помимо общерудничной естественной тяги в зимнее время года на работу ГВУ существенное влияние оказывают какие-то другие факторы.

В этом случае формула (2.8) для определения величины давления, развиваемого ГВУ, с учетом возникающей общерудничной естественной тяги и другого вида тяги (обозначим через $\tilde{h}_{\rm e}$) примет вид:

$$h_{\rm B} = \tilde{h}_{\rm e} + h_{\rm e} + R_{\rm pyz} Q_{\rm B}^2. \tag{2.24}$$

Установить зависимость переменной $\tilde{h}_{\rm e}$ от режима работы ГВУ и системы воздухоподготовки можно для каждого рудника в отдельности при проведении на нем испытаний, аналогичных описанным в настоящей работе: измерений производительности и давления, развиваемого ГВУ, при различных скоростях вращения рабочего колеса вентилятора и при различных параметрах наружного воздуха.

Получив зависимость изменения параметров работы ГВУ при влиянии внешних факторов (\tilde{h}_e) и спрогнозировав значение общерудничной естественной тяги в зависимости от изменяющихся параметров наружного воздуха, можно спрогнозировать требуемый режим работы проветривания.

Выяснить параметры наружного воздуха можно заблаговременно по результатам метеорологических условий. В настоящее время, согласно [232–234], успешность (оправдываемость) гидрометеорологических прогнозов и предупреждений об атмосферных явлениях достигает 85–90 %. Следовательно, получив данные метеорологических условий, можно заблаговременно рассчитать значение общерудничной естественной тяги и выбрать режим работы ГВУ, при котором будет обеспечиваться требуемый режим проветривания.

2.4. Выводы по разделу

В ходе проведенных исследований факторов, влияющих на режимы работы ГВУ и на воздухораспределение между шахтными стволами при изменяющихся внешних условиях, получены следующие результаты и сделаны выводы:

1. Величина и направление общерудничной естественной тяги зависят только от параметров наружного воздуха. Определить ее значение можно при остановке работы ГВУ. При работе системы воздухоподготовки и ГВУ, помимо общерудничной естественной тяги, на процесс проветривания будут оказывать влияние другие факторы, не зависящие от параметров подаваемого в воздухоподающие стволы воздуха.

- 2. Определить величину общерудничной естественной тяги в период работы ГВУ можно по приведенной методике с заданной доверительной вероятностью. При этом регулировать возможный диапазон управления работой ГВУ можно путем изменения уровня значимости, выбирая оптимальное его значение.
- 3. Величину общерудничной естественной тяги при отключенной системе воздухоподготовки можно определить теоретическим путем при известных параметрах рудника (шахты) и наружного воздуха. Следовательно, в отсутствии воздухоподготовки по значениям метеорологического прогноза можно заранее определить величину общерудничной естественной тяги, спрогнозировав режим работы ГВУ.
- 4. На режим проветривания подземного горнодобывающего предприятия, помимо сезонного колебания параметров наружного воздуха, влияют случайные факторы, которые можно оценить численно путем проведения эксперимента и оценки полученных результатов по приведенной в настоящей главе методике.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ И БЕЗОПАСНЫХ СИСТЕМ ВОЗДУХОПОДГОТОВКИ

Правилами безопасности [91] предписывается в холодное время года подаваемый в шахтные стволы воздух нагревать до температуры не ниже +2°С, при этом данному значению температуры должен соответствовать весь объем воздуха, поступающего по стволу по всему его сечению. Результаты анализа, проведенного ранее (см. п. 1.2), позволяют утверждать, что на практике наблюдается другая картина. Причина заключается в невозможности полной герметизации надшахтного здания воздухоподающего ствола, вследствие чего в нем присутствуют инфильтрации (подсосы) наружного воздуха, и в ствол, помимо нагретого в ШКУ, поступает холодный воздух с дневной поверхности. В этом случае в воздухоподающем стволе возникают участки, в которых воздух не нагрет до требуемой температуры (см. рисунок 1.1).

Ввиду того, что процесс проветривания и воздухоподготовки в холодное время года является энергоемким, на подземных горнодобывающих предприятиях изыскиваются способы снижения энергетических затрат на работу ШКУ и ГВУ.

Для решения настоящих проблем необходимо выполнить следующее задачи:

- разработать конструкцию ШКУ или способ воздухоподготовки, позволяющие осуществлять нагрев воздуха с меньшими энергетическими затратами;
- разработать новый или усовершенствовать существующие способы подачи воздуха в воздухоподающий ствол, при котором будет обеспечиваться требуемое смешивание потоков воздуха;
- использовать потенциал вторичных источников энергии для повышения эффективности проветривания в процессе воздухоподготовки.

3.1. Математическое моделирование тепломассопереноса в воздухоподающих стволах при осуществлении воздухоподготовки в холодное время года

При моделировании процесса распределения потоков воздуха в воздухоподающем стволе в период воздухоподготовки необходимо учитывать, что ствол армирован. В работах [235, 236] установлено, что в этом случае расстрелы и направляющие в стволе противодействуют смешиванию потоков и являются причиной различной их скорости. В связи с этим в построенной модели, в отличие от работ, проведенных в прошлом, где ствол представлен в виде полого цилиндра, все элементы армировки присутствуют (рисунок 3.1).

В результате проведенного моделирования подтвердилось предположение, что по сечению ствола наблюдается неравномерный прогрев воздуха, т.е. в нем присутствуют участки, где двигается холодный воздух. При этом по мере движения вниз по стволу холодный воздух не смешивается с остальными потоками (нагретым воздухом), а перемещается в другие области, лишь незначительно увеличивая свою температуру.

По мере увеличения температуры поступающего из ШКУ воздуха с 5 до 9 °С (рисунок 3.2) распределение тепловых потоков по стволу существенно не меняется: незначительно повышается температура в зонах холодного воздуха. Следовательно, только при значительном повышении температуры воздуха, подаваемого по калориферному каналу из ШКУ, в «непрогретых» участках, где его температура близка или равна критической (+ 2 °С), можно будет обеспечить требуемое тепловое распределение. Однако в этом случае подаваемый воздух будет «перегрет» на значительно больше требуемого значения температуру.

При повышении температуры воздуха, поступающего в воздухоподающий ствол, как доказано в главе 2, увеличивается величина отрицательной общерудничной естественной тяги, препятствующей работе ГВУ. Поэтому, помимо пере-

расхода энергоресурсов на нагрев воздуха в ШКУ, необходимо будет увеличивать производительность ГВУ. В этом случае также возникает проблема повышения затрат электроэнергии на проветривание.

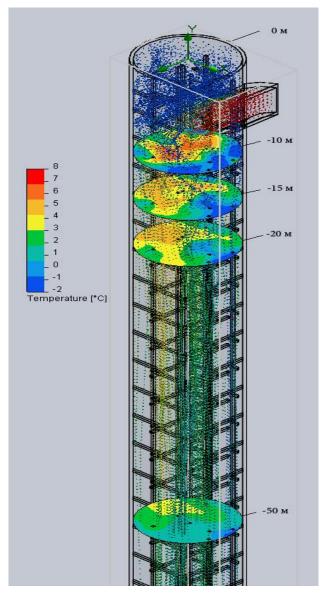


Рисунок. 3.1 – Распределение теплового поля по воздухоподающему стволу

Кроме того, наличие в воздухоподающем стволе участков тепловых потоков, имеющих различную температуру, приведет к тому, что в нем самом появится перепад давлений — «внутристволовая естественная тяга» [13, 93]. Также в работах [13, 93] описана проблема возникновения в воздухоподающих стволах «воздушных пробок». В результате этого явления по одному из воздухоподающих стволов в рудник почти полностью перестает

поступать воздух, а по другому (остальным) – начинает поступать

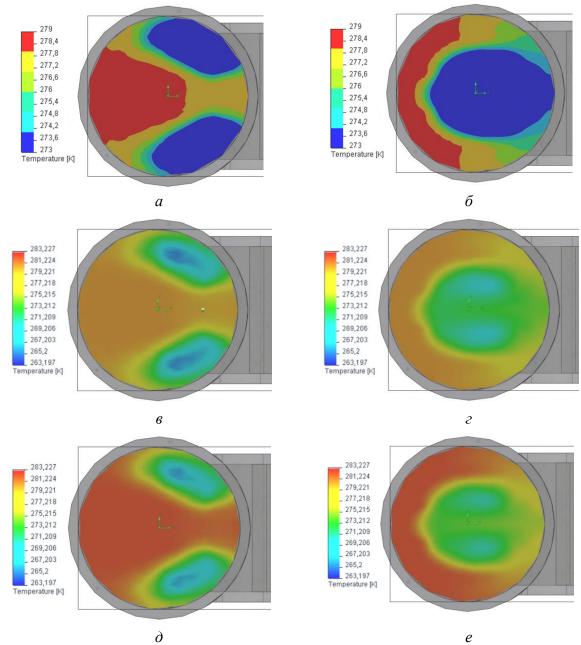


Рисунок 3.2 — Распределение тепловых потоков по стволу при $Q_{\rm ШКУ}=147,27~{\rm m}^3/{\rm c}$ и $Q_{\rm H.3д.}=20,71~{\rm m}^3/{\rm c}$: $a, \, e, \, \partial$ — на отметке минус 15 м; $\delta, \, e, \, e$ — на отметке минус 30 м, при изменяющейся температуре воздуха, поступающего через калориферный канал: $a, \, \delta-5~{\rm ^oC}; \, a, \, \delta-7~{\rm ^oC}; \, a, \, \delta-9~{\rm ^oC}$

в завышенном объеме. Следовательно, через ШКУ соседнего (соседних) воздухоподающих стволов может пройти воздух в объеме, не рассчитанном на ее теплопроизводительность, что может привести к выводу из строя системы воздухоподготовки. Как показывает практика, единственным способом «про-

бить» в воздухоподающем стволе «воздушную пробку» является принудительная многократная проходка скипа и/или клети через блокированный по воздуху участок.

«Воздушные пробки» в воздухоподающих стволах возникают только в период работы ШКУ (в отопительный период) [13, 93], в результате чего можно утверждать, что причиной этого негативного явления явлется именно «внутристволовая естественная тяга».

Еще одно предположение — присутствующий в формуле (2.24) коэффициент \tilde{h}_e и есть та самая внутристволовая естественная тяга. Следовательно, избавившись от проблемы низкой эффективности воздухоподготовки в холодное время года, можно решить проблему «перерасхода» энергоресурсов на проветривание и избежать аварийных ситуаций, связанных с возникновением в воздухоподающих стволах «воздушных пробок».

3.2. Воздухоподготовка в шахтной калориферной установке, расположенной в калориферном канале

В настоящее время на шахтах и рудниках производится активная замена водяных калориферных установок на газовые ввиду более высокого КПД последних. Однако на работу обоих типов калориферных установок расходуется «невозобновляемый» источник энергии – природный газ (на нагрев воды в котельной установке – для водяных; на разогрев теплообменной камеры – для газовых). В связи с решением правительства РФ, принятым в 2012 году, согласно которому в будущем планируется постоянное повышение цен на природный газ, появляется необходимость разрабатывать энерго- и ресурсосберегающие калориферные установки.

В результате оптимизации затрат на воздухоподготовку возникает угроза внедрения в производство ШКУ, не соответствующих требованиям безопасности.

Таким образом, необходимо провести анализ возможных изменений в конструкции ШКУ на действующих подземных горнодобывающих предприятиях с целью определения исследования эффективности и безопасности их работы.

3.2.1. Расчет теплопроизводительности шахтной калориферной установки, расположенной в калориферном канале

Для повышения энергоэффективности воздухоподготовки необходимо увеличивать поверхность теплообмена. Однако увеличение габаритных размеров нагревательных элементов повлечет за собой соответствующее увеличение размеров всей ШКУ, а следовательно, и площади занимаемой ею на промплощадке. Для решения этой проблемы в работе [237] была предложена конструкция ШКУ, состоящая из пластинчатых элементов. Расположение пластинчатых элементов по ходу движения воздуха должно обеспечить минимальное аэродинамическое сопротивление при высоком коэффициенте теплоотдачи (большой площади теплообмена). Сущность предлагаемого технического решения (рисунок 3.3) заключается в том, что применяемые в ШКУ 2 пластинчатые электронагревательные элементы 3 закреплены в части 6 калориферного канала 1, прилегающей к воздухоподающему стволу 5 и ориентированы по потоку воздуха 4, поступающему в калориферный канал (рисунок 3.3), а их температура регулируется путем изменения приложенного к ним напряжения. Подобное расположение пластин увеличит поверхность теплообмена, но при этом не потребуется дополнительного места на промплощадке, так как электронагревательные пластины будут расположены в свободном месте – калориферном канале.

Для ведения расчетов были приняты следующие параметры: объем воздуха, поступающего в воздухоподающий ствол $Q_{\rm руд} = 250~{\rm m}^3/{\rm c}$; район расположения рудника — Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей (ВКМКС); электронагревательные пластины выполнены из стали X13; длина, ширина, высота калориферного канала соответственно равны 25, 5 и 5 м.

Параметры наружного воздуха принимались согласно строительным нормам и правилам [94]. Для указанного региона температура наружного воздуха наиболее холодной пятидневки составляет $T_{\text{нар}} = -36$ °C, относительная влажность воздуха $\phi = 70$ %, атмосферное давление $p_{\text{a}} = 742,7$ мм рт. ст. $\approx 99018,25$ Па.

При длине пластины $l_{\text{пл}}$ (м) число Рейнольдса согласно [238, 239] определяется по формуле

$$\operatorname{Re}_{\mathrm{k}l} = \frac{\omega_{\mathrm{k}} \cdot l}{v_{\mathrm{k}}} = \frac{Q_{\mathrm{LIKY}} \cdot l_{\mathrm{III}}}{S_{\mathrm{KK}} \cdot v_{\mathrm{k}}},$$
(3.1)

где $\omega_{\text{ж}}$ – скорость движения воздуха в калориферном канале, м/с; $v_{\text{ж}}$ – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с; S_{KK} – сечение калориферного канала, м²; $Q_{\text{ШКУ}}$ – объем воздуха, поступающего в калориферный канал, м³/с.

При $Re_{*l} > 10^5$ режим течения воздуха в пограничном слое у поверхности пластины будет являться турбулентным.

Среднее значение коэффициента теплоотдачи (α) при обтекании пластины согласно [238, 239] можно найти по формулам:

– при ламинарном режиме течения воздуха

$$\overline{\mathrm{Nu}}_{\mathrm{x}l} = 0.57 \cdot \mathrm{Re}_{\mathrm{x}l}^{0.5}; \tag{3.2}$$

– при турбулентном режиме течения воздуха

$$\overline{\mathbf{N}\mathbf{u}}_{\mathbf{k}l} = \mathbf{0.032 \cdot Re}_{\mathbf{k}l}^{0.8} \tag{3.3}$$

Подставив выражение (3.1) в уравнения (3.2) или (3.3), получим величину критерия Нуссельта ($\overline{\overline{Nu}}_{*l}$).

Тогда среднее значение коэффициента теплоотдачи найдется как

$$\overline{\alpha} = \overline{Nu}_{xl} \cdot \frac{\lambda_{x}}{l_{nn}}, \tag{3.4}$$

где $\lambda_{\mathtt{m}}$ – теплопроводность воздуха, $\mathrm{Bt/}(\mathtt{m}\cdot K)$.

Величины $v_{\rm ж}$ и $\lambda_{\rm ж}$ согласно [239] при температуре воздуха $T_{\rm нар}=-36$ °C и $p_{\rm a}=742,7$ мм рт. ст. соответственно равны $v_{\rm ж}=10,34\cdot10^{-6}$ м²/с, $\lambda_{\rm ж}=2,15\cdot10^{-2}$ Вт/(м·К).

В нашем случае число Рейнольдса равно 24177950, т.е. режим – турбулентный.

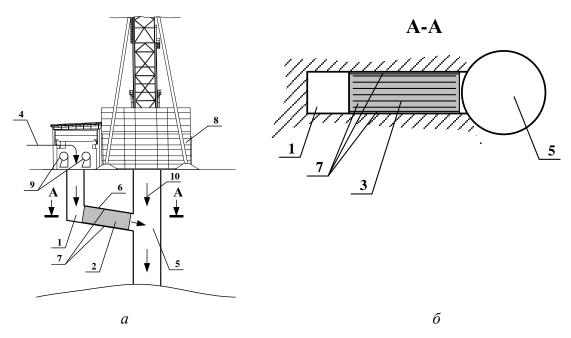


Рисунок 3.3 — Шахтная калориферная установка, расположенная в калориферном канале: a — вид сбоку; δ — вид сверху (разрез); I — калориферный канал; 2 — калориферная установка; 3 — электронагревательные пластины; 4 — подогреваемый воздух; 5 — воздухоподающий ствол; δ — часть калориферного канала, прилегающая к воздухоподающему стволу; 7 — теплоизоляционный слой; 8 — надшахтное здание воздухоподающего ствола; 9 — нагнетательные вентиляторы; 10 — подсосы воздуха через надшахтное здание

Средняя температура поверхности пластины согласно [239] определяется по формуле

$$\overline{T_{\rm cp}} = T_{\rm hap} + \frac{U^2 \cdot \delta_{\rm min}}{2 \cdot a_{\rm min} \cdot \overline{\alpha} \cdot l_{\rm min}^2 \cdot \rho_{\rm s}},$$
(3.5)

где $T_{\text{нар}}$ – температура наружного воздуха, °C; U – напряжение, прикладываемое к пластинам, B; $\delta_{\text{пл}}$ – толщина пластины, м; ρ_{9} – удельное электрическое сопротивление материала, из которого выполнена пластина, Ом·м (для стали X13 ρ_{9} = 0,5·10⁻⁶ Ом·м); $a_{\text{пл}}$ – ширина пластины, м.

Согласно [239] значение среднемассовой температуры воздуха при движении его в канале, оборудованном нагреваемой пластиной, определяется по формуле

$$T_{\text{KK}} = T_{\text{Hap}} + \frac{q_c \cdot \Pi \cdot l_{\text{ILT}}}{G_{\text{IIIKY}} \cdot c_p}, \tag{3.6}$$

где $q_{\rm c}$ – плотность теплового потока, передаваемого от стенки пластины, ${\rm BT/m^2}$; Π – периметр поперечного сечения пластины, м; $G_{\rm IIIKY}$ – объемный расход воздуха, кг/с ($G_{\rm IIIKY} = Q_{\rm IIIKY} \cdot \rho_{\rm нар}$); c_p – изобарная удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К).

Изобарная теплоемкость воздуха согласно [238] определяется по формуле

$$c_p = c_{\text{C.B.}} + \frac{c_{\text{B.II.}} \cdot d}{1000}$$
, (3.7)

где $c_{\text{С.В.}}$ – удельная массовая теплоемкость сухого воздуха, равная 1004,8 Дж/(кг·К) (средняя для температур в интервале 0...100 0 C); $c_{\text{В.п.}}$ – удельная массовая теплоемкость водяного пара, равная 1806,8 Дж/(кг·К); влагосодержание d, согласно [184] определяемое по формуле

$$d = 623 \cdot \frac{p_{\Pi}}{p_{\rm a} - p_{\Pi}}, \, _{\Gamma/K\Gamma}, \tag{3.8}$$

где p_{Π} — парциальное давление водяного пара, мм рт. ст., которое согласно [240] определяется по формуле

$$p_{\Pi} = \varphi \cdot \exp\left(18,5916 - \frac{3991,11}{T_{\text{\tiny HAID}} + 233,24}\right),$$
 (3.9)

где ϕ — относительная влажность воздуха (для выбранного региона равна 70 %, т.е. 0,7 о.е. [94]).

Для замкнутого (по периметру) канала закон Ньютона – Рихмана записывается в виде

$$q_{\rm c} = \overline{\alpha} \cdot \left(\overline{T_{\rm c}} - T_{\rm KK} \right), \tag{3.10}$$

Подставив выражение (3.10) в уравнение (3.6) найдем температуру воздуха в канале при нагреве напряжением U, пластины длиной $l_{\text{пл}}$, толщиной $\delta_{\text{пл}}$ и шириной $a_{\text{пл}}$:

$$T_{\text{KK}} = \frac{Q_{\text{IIIKY}} \cdot \rho_{\text{Hap}} \cdot c_{p} \cdot T_{\text{Hap}} + \overline{\alpha} \cdot \Pi \cdot l_{\text{III}} \cdot \overline{T_{c}}}{\left(Q_{\text{IIIKY}} \cdot \rho_{\text{Hap}} \cdot c_{p} + \overline{\alpha} \cdot \Pi \cdot l_{\text{III}}\right)}.$$
(3.11)

Температура воздуха между пластиной и термостеклом (участки 1 и 5) с учетом закона Ньютона — Рихмана определяется по формуле

$$T_{\text{KK1(5)}} = \frac{Q_i \cdot \rho_{\text{cp}} \cdot C_{\text{p1(5)}} \cdot T_{\text{1(5)}} + \alpha \cdot \Pi \cdot l_{\text{III}} \cdot \overline{T_{\text{c}}}}{\left(Q_i \cdot \rho_{\text{cp}} \cdot C_{\text{p1(5)}} + \alpha \cdot \Pi \cdot l_{\text{III}}\right)} + \frac{\alpha \cdot T_{\text{Tc}} - q_{\text{Tc}, i}}{\alpha}, \quad (3.12)$$

где $T_{\text{тс}}$ и $q_{\text{тс}, i}$ — соответственно средняя температура и плотность теплового потока, передаваемого от термостекла, Вт/м^2 .

Согласно [241] плотность теплового потока, передаваемого от термостекла, определяется по формуле

$$q_{\text{TC}, i} = \frac{P}{2 \cdot (m_i + c) \cdot l_{\text{III}}}, \tag{3.13}$$

где P – активная электрическая мощность, расходуемая на нагрев термостекла, Вт [242].

На участке 2–4, температура воздуха найдется как

$$T_{KK2-4} = \frac{\alpha \cdot T_{TC} - q_{TC, 2-4}}{\alpha}.$$
 (3.14)

Значение требуемой температуры воздуха на выходе из канала, оборудованного по периметру нагревательными элементами, определяется по формуле

$$T_{KK2} = \frac{c_{\rho 1}}{c_{\rho 2}} T_{KK1} + \frac{P_{rc}}{S_{KK} \cdot \rho_{cp} \cdot c_{\rho 2} \cdot \omega_{x}},$$
(3.15)

где T_{KK1} — температура воздуха на входе в канал, °C; c_{ρ_1} и $c_{\rho 2}$ — изобарная теплоемкость воздуха, определяемая по табличным значениям [241] соответственно для температур воздуха T_{KK1} и T_{KK2} , кДж/(кг· °C); P_{TC} — тепловая мощность термостекла (равна активной электрической мощности), Вт;

 $ho_{\rm cp}$ — плотность воздуха, определяемая по среднему значению температур T_{KK1} и T_{KK2} , ${\rm kr/m}^3$.

Поскольку $c_{\rho 2}$ и ρ_{cp} определяются через неизвестную температуру воздуха T_{KK2} , то для решения уравнения (3.15) используется итерационный процесс, при котором каждое последующее значение температуры воздуха на выходе из канала определяется по формуле

$$T_{\text{KK2}}^{(i)} = \frac{c_{\rho 1}}{c_{\rho 2}^{(i-1)}} T_{\text{KK1}} + \frac{P_{\text{TC}}}{S_{\text{KK}} \cdot \rho_{\text{cp}}^{(i-1)} \cdot c_{\rho 2}^{(i-1)} \cdot \omega_{\text{x}}},$$
(3.16)

где i — номер итерации.

Процесс продолжается до требуемой точности вычислений, которая определяется по формуле

$$\varepsilon = \left| \frac{T_{\text{KK2}}^{(i)} - T_{\text{KK2}}^{(i-1)}}{T_{\text{KK2}}^{(i-1)}} \right| 100, \%, \tag{3.17}$$

где $T_{\rm KK2}^{(i-1)}$ и $T_{\rm KK2}^{(i)}$ — температуры воздуха на выходе из калориферного канала соответственно полученная в предыдущей итерации и полученная из уравнения (3.16) в ходе расчетов, °C.

Температура воздуха в калориферном канале определяется как сумма температур смешанных потоков воздуха, проходящих между парами пластин (области 2, 3 и 4) и крайними пластинами и термостеклом (области 1 и 5) (рисунок 3.4).

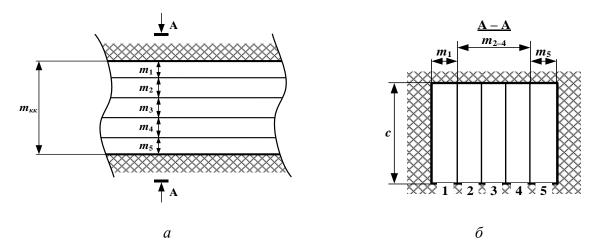


Рисунок 3.4 — Расположение электронагревательных пластин в калориферном канале: a — вид сверху; δ — вид спереди (разрез)

Величина тепла, выделяемого при проходе тока (I) по пластине, равна по величине активной мощности

$$P = \frac{U^2 \cdot \delta_{\text{min}} \cdot a_{\text{min}}}{l_{\text{min}} \cdot \rho_{\text{s}}}.$$
 (3.18)

Величина тока, проходящего через пластину, найдется по формуле

$$I = \frac{P}{U}, A. \tag{3.19}$$

При неизменной высоте калориферного канала величина c_i (рисунок 3.4, δ) изменяться не будет, но при увеличении количества пластин будет меняться величина m_i (рисунок 3.4, a).

При равномерном распределении пластин по периметру калориферного канала расстояние между пластинами можно найти как

$$m_i = \frac{m_{_{\rm KK}}}{n_{_{\rm HII}} + 1}$$
, (3.20)

где $m_{\rm kk}$ — ширина калориферного канала (см. рисунок 3.4, a), м.

Изменяя количество пластин $(n_{пл})$, напряжение, прикладываемое к пластинам (U), согласно [243] определяется температура воздуха, подаваемого из калориферной установки $(T_{\text{ШКУ}})$, по формуле

$$T_{\text{IIIKY}} = \frac{0.8598 \cdot 10^{6} - Q_{\text{IIIKY}} \cdot \rho_{\text{hap}} \cdot c_{p} \cdot T_{\text{hap}} \cdot 3600}{Q_{\text{IIIKY}} \cdot \rho_{\text{hap}} \cdot c_{p} \cdot 3600}.$$
 (3.21)

Предположив, что подсосы воздуха через надшахтное здание (см. рисунок 1.1) равны нулю, из формулы (3.21) получим температуру воздуха ($T_{\text{возд}}$), поступающего в воздухоподающий ствол. Температура воздуха $T_{\text{возд}}$ и потребляемая калориферной установкой активная мощность ($P_{\text{уст}}$) при различном количестве пластин и различной их толщине приведены в таблицах 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 — Температура воздуха, подаваемого в рудник, и электроэнергия, потребляемая калориферной установкой при различном напряжении, прикладываемом к пластинам и различном их количестве ($\delta = 0.01$ м = 10 мм)

II D	$n_{\scriptscriptstyle \Pi \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! \! $	$n_{\scriptscriptstyle \Pi \Pi} = 5$	$n_{\Pi\Pi} = 6$				
U, B	$T_{ m BO3J},{}^0{ m C}$						
5	-30,25	-29,05	-27,87				
6	-27,72	-25,99	-24,30				
7	-24,74	-22,38	-20,07				
8	-21,30	$-18,\!22$	-15,21				
9	-17,40	-13,51	-9,70				
10	-13,05	-8,25	-3,55				
11	-8,25	-2,44	3,24				
12	-3,00	3,91	10,67				
	$oldsymbol{P}_{ extsf{yct}}$, к $ ext{B}_{ ext{T}}$						
	_	2880	2904				

Однако полученные результаты могут быть неточными, так как при расчетах невозможно учесть распределение теплового поля по сечению калориферного канала.

Таблица 3.2 — Температура воздуха, подаваемого в рудник, и электроэнергия, потребляемая калориферной установкой при различном напряжении, прикладываемом к пластинам и различном их количестве ($\delta = 0.015$ м = 15 мм)

U, B	$n_{\scriptscriptstyle \Pi\Pi}=4$	$n_{\scriptscriptstyle \Pi \Pi} = 5$	$n_{\Pi\Pi}=6$			
C, B	$T_{ t возд}$, 0 С					
5	-27,38	-25,57	-23,81			
6	-23,59	-20,99	-18,45			
7	-19,12	-15,59	-12,13			
8	-13,97	-9,36	-4,84			
9	-8,14	-2,30	3,40			
10	-1,63	5,57	12,61			
11	5,56	14,26	22,77			
12	13,41	23,77	33,89			
$ extbf{\emph{P}}_{ ext{yct}}$, к $ ext{B}_{ ext{T}}$						
	2904	3000	2916			

Как видно из данных таблиц 3.1 и 3.2, на нагрев воздуха в ШКУ, расположенной в калориферном канале, требуются достаточно большие значения электрической мощности калориферной установки. Требуемое значение температуры воздуха, подаваемого в рудник, достигается при подаче напряжения 12 В и установке 5 пластин, а также при подаче напряжения 11 В и установке 6 пластин

(см. таблицу 3.1). При увеличении толщины пластин (см. таблицу 3.2) возрастает активная мощность установки. Поэтому принимается первый вариант при установке 5 пластин толщиной 10 мм и приложенным напряжением 12 В (см. таблицу 3.1) – 2880 кВт, что соизмеримо с мощностью ГВУ, обеспечивающей подачу данного объема воздуха в рудник. Однако следует учитывать, что расчеты приведены для температуры наиболее холодной пятидневки (–36 °C), т.е. для наихудших условий. Для нагрева воздуха в ШКУ, выполненных из ТЭНов, при аналогичных условиях, согласно расчетам [244], требуется 13536 кВт активной мощности, т.е. почти в 5 раз больше.

При этом в качестве материала пластин была выбрана техническая сталь, обладающая не самыми лучшими, с точки зрения преобразования электрической энергии в тепловую, свойствами. В случае изготовления пластин из материала, обладающего лучшими свойствами по сравнению со сталью, снизится потребляемая калориферной установкой активная мощность.

Кроме того, в работе [237] в качестве теплоизоляционного материала, как одного из вариантов, было предложено использовать термостекло (thermo glass) [242]. Этот материал обладает требуемыми свойствами: с одной стороны термостекло нагревается и отдает тепло внутрь калориферного канала, а другая сторона является теплоизоляционной, защищающей от теплопотерь.

По приведенным выше формулам после расчета получаем, что на нагрев воздуха с температуры −36 °C до +2°C в ШКУ потребуется мощность 2880 кВт. Расчет требуемой мощности ШКУ при совместном нагреве воздуха электронагревательными пластинами и термостеклом с учетом потребляемой мощности термостекла составит 2558,8 кВт, т.е. снизится на 321,2 кВт (≈ на 11%).

По данным источника [244] отопительный период в 2012/2013 годах (взят для примера) составил 5 месяцев (ноябрь — март) со средней температурой наружного воздуха –10,16 °C. В результате расчетов для этого периода установлено, что при заданной среднемесячной температуре на работу ШКУ потребуется 793,8 кВт электрической мощности, а в случае оборудования калориферного канала термостеклом – 574,29 кВт, т.е. на 219,51 кВт меньше.

Принимая цену за электроэнергию в среднем равной 3 руб/кВт·ч и время работы установки 3624 ч (5 месяцев), получим экономию на нагрев воздуха в сумме 2386,513 тыс. руб. (795,504 МВт·ч). Общие затраты на электроэнергию, потребляемую ШКУ за отопительный период, составят 6243,68 тыс. руб. (2081,227 МВт·ч).

На нагрев воздуха заданного объема ($Q_{\rm руд} = 250~{\rm m}^3/{\rm c}$) с температуры — $10,16~{\rm ^{\circ}C}$ до $+2~{\rm ^{\circ}C}$ в действующих в настоящее время водяных калориферных установках при пересчете на затраты природного газа, расходуемого в котельной установке на нагрев воды по методике [243], и средней цене за природный газ 4 руб./м³ потребуется 7642,49 тыс. руб., т.е. на 1398,81 тыс. руб. больше, чем в предлагаемой установке (\approx на 18%).

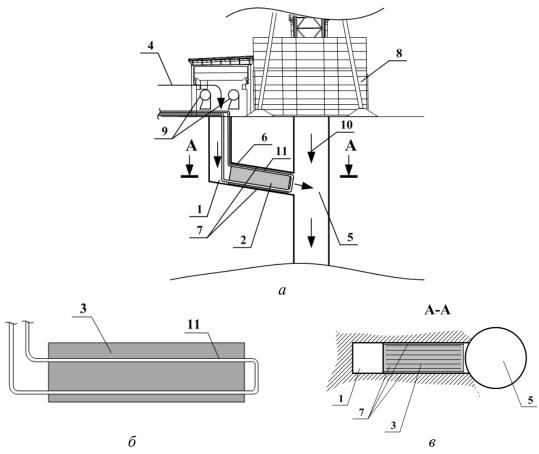


Рисунок 3.5 — Расположение нагревательных пластин в калориферном канале: a — электрическая ШКУ; δ — водяная ШКУ; ϵ — нагревательный элемент водяной ШКУ; ϵ — вид ШКУ сверху (разрез); I — калориферный канал; 2 — ШКУ; δ — нагревательные пластины; δ — подогреваемый воздух; δ — воздухоподающий ствол; δ — часть калориферного канала, прилегающая к воздухоподающему стволу; δ — термостекло (thermo glass); δ — надшахтное здание; δ — нагнетательные вентиляторы; δ — подсосы воздуха через надшахтное здание; δ — трубки с теплоносителем в водяной ШКУ

Из-за достаточно больших затрат электроэнергии на работу электрических ШКУ и необходимости использования мощного источника ее передачи, такие установки используются достаточно редко, в основном они находят применение в районах арктического и субарктического климата. Однако предложенное решение можно использовать в водяных ШКУ. В этом случае вместо электронагревательных пластин будут использоваться металлические пластины, являющиеся ребрами трубок с теплоносителем (рисунок 3.5, δ).

Расчеты в работах [244, 245] показали, что применение такого способа воздухоподготовки позволит снизить затраты на нее примерно в 7 раз.

Следует учитывать, что проведенные выше расчеты показывают среднюю температуру воздуха, выходящего из ШКУ, т.е. по ним можно судить о требуемой тепловой мощности для работы системы воздухоподготовки, но нельзя точно определить термическую стратификацию по сечению калориферного канала.

Таким образом, необходимо произвести моделирование процесса тепломассопереноса в рассматриваемой ШКУ.

3.2.2. Моделирование процесса тепломассопереноса в системе «воздухонагреватель – канал – ствол» при использовании нагревательных пластин

Для определения характера распределения температурного поля между нагревательными пластинами в калориферном канале была составлена математическая модель ШКУ, геометрическая модель которой построена в модуле Design Modeler (программная оболочка ANSYS Workbench). Модель создана в программном пакете ANSYS CFX. На геометрическую сетку в модели наносилась конечно-объемная сетка, которая сгущалась к границам в количестве 15 приграничных слоев с коэффициентом роста 1,1. В построенной модели сетка состоит из 3 112 939 узлов и 11 666 631 элемента.

В построенной математической модели приняты следующие граничные условия (ГУ).

ГУ № 1 — инфильтрации (подсос) наружного воздуха через надшахтное здание с параметрами: скорость 2 м/с [93]; температура — -36 °C [94] (рисунок 3.5).

ГУ № 2 – воздух, подаваемый в ШКУ с параметрами: скорость 10 м/c [93]; температура – -36 °C [94] (рисунок 3.6).

ГУ № 3 — давление воздуха в данной точке принято равным 0 Па (рисунок 3.6). Связано это с тем, что задача смешивания нагретого в ШКУ и подсасываемого через надшахтное здание потоков воздуха не ставилась, данное граничное условие принято opening (открытый выход).

ГУ № 4 — параметры нагревательных пластин ШКУ: идеальная стенка, без прилипания, гладкая, температура пластин 40 °C [244, 246] (см. рисунок 3.6).

ГУ № 5 – симметрия калориферного канала с воздухоподающим стволом.

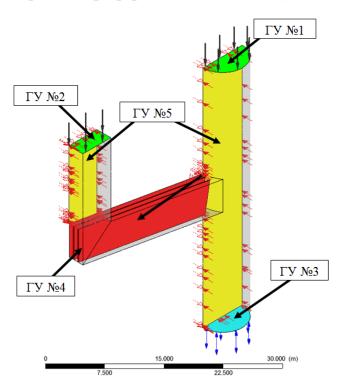


Рисунок 3.6 – Граничные условия построенной математической модели ШКУ

По заданным ГУ в математической модели первоначально была определена скорость потока воздуха в калориферном канале в различных сечениях (рисунок 3.7). Как видно из рисунка, скоростные потоки воздуха в калориферном канале распределены неравномерно. В нижней части канала скорость значительно выше, чем в верхней его части. Причина этого явления заключается в геометрии калориферного канала. Как было установлено в работе [247], эта

проблема возникает и в канале ГВУ, в результате чего излишняя электроэнергия расходуется на преодоление местного аэродинамического сопротивления каналов. Таким образом, одной из выявленных в ходе математического моделирования проблем является геометрия калориферного канала, препятствующая нормальному распределению градиента скорости воздушного потока.

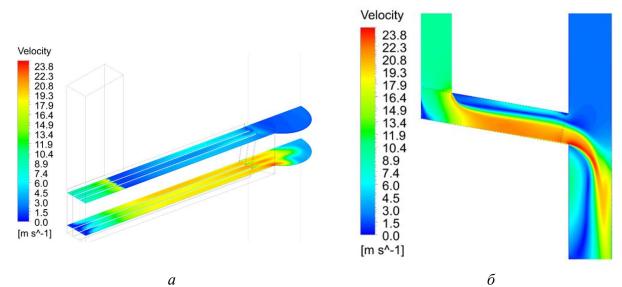


Рисунок 3.7 — Распределение скорости воздуха в различных сечениях: a — в калориферном канале; δ — в плоскости симметрии расчетной области

Распределение температурного поля в калориферном канале показано на рисунке 3.8.

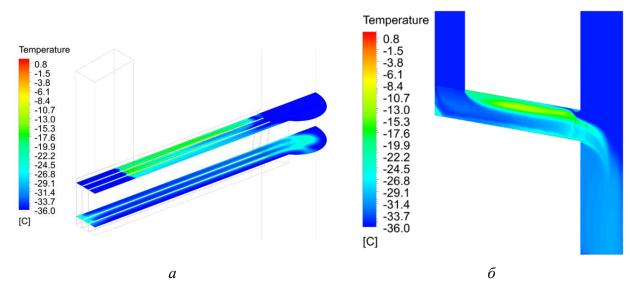


Рисунок 3.8 — Распределение температуры в различных сечениях: a — в калориферном канале; δ — в плоскости симметрии расчетной области

Из рисунка видно, что температурный градиент воздуха неравномерный и направлен в верхнюю часть калориферного канала. Кроме того, видно, что в нижней части канала воздух практически не прогревается.

С увеличением количества пластинчатых нагревательных элементов в ШКУ и их температуры выявленная проблема не решается. В этом случае суммарное значение температуры воздуха на выходе из ШКУ можно привести к требуемому (+2°С) значению, но при этом нагретый воздух «скапливается» в верхней части калориферного канала. С увеличением нагрева пластин наблюдается смещение градиента температур в верхнюю часть калориферного канала и повышение разности между значениями температур потоков воздуха вверху и внизу канала.

Для решения указанного вопроса необходимо решить следующие проблемы.

Во-первых, проблема распределения температурного поля связана с тем, что воздух ввиду его низких теплопроводящих свойств нагревается вблизи нагревательных элементов. В связи с этим проблему неравномерного распределения температурного поля в калориферном канале можно решить при обеспечении турбулизации потока воздуха. Для этого нагнетательные вентиляторы необходимо установить на входе и/или выходе потока воздуха в ШКУ (в калориферном канале). В этом случае дополнительно появляется возможность осуществлять более плавное регулирование процесса смешивания потоков воздуха в воздухоподающем стволе.

Во-вторых, в ШКУ необходимо изменить расположение пластин с вертикального на горизонтальное. В этом случае калориферный канал разобьется на поэтажные участки, в которых температурное распределение воздуха, по сравнению с рассматриваемой ШКУ, будет более равномерным.

С учетом вышеприведенных недостатков была разработана конструкция ШКУ, приведенная на рисунке 3.9 [248].

Результаты математического моделирования распределения скоростных потоков при предлагаемой конструкции ШКУ представлены на рисунке 3.10.

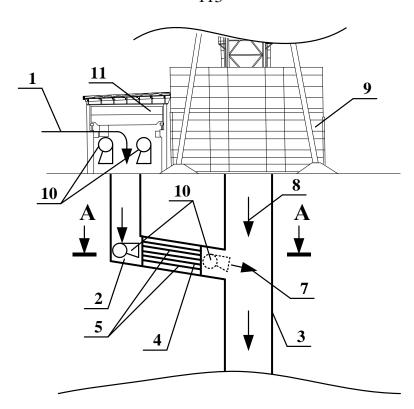


Рисунок 3.9 — Поэтажное расположение нагревательных пластинчатых элементов в ШКУ: 1 — наружный воздух; 2 — калориферный канал; 3 — воздухоподающий ствол; 4 — шахтная калориферная установка; 5 — пластинчатые элементы; 6 — трубки с теплоносителем; 7 — нагретый воздух; 8 — подсасываемый наружный воздух; 9 — надшахтное здание; 10 — нагнетательные вентиляторы; 11 — поверхностное здание

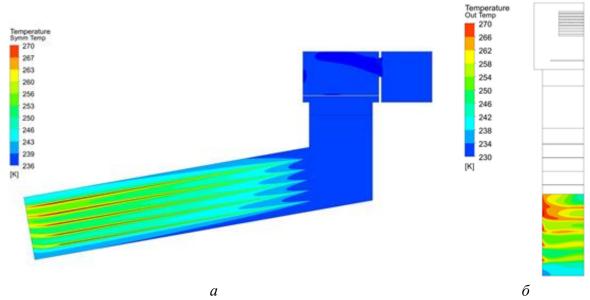


Рисунок 3.10 — Распределение теплового поля в калориферном канале, при горизонтальном расположении нагревательных пластинчатых элементов: a — вид сбоку; δ — вид спереди

По распределению теплового поля видно, что и в этом случае температурный градиент смещен в сторону верхней части калориферного канала. Но при этом данное явление наблюдается в значительно в меньшей степени, и прогрев воздуха в ШКУ более равномерный. При турбулизации потока на выходе из установки можно добиться смешанного однородного потока.

При использовании предлагаемой установки в каждом отдельном случае необходимо оценивать затраты энергоресурсов на нагрев пластин и работу нагнетательных вентиляторов. Однако в любом случае при использовании подобной конструкции есть положительный эффект, связанный с тем, что нагнетательный вентилятор (стоящий на выходе калориферного канала) будет нагнетать поток нагретого воздуха в ствол, минуя препятствие — калориферный канал, в котором, как видно из рисунка 3.7, изменяется по сечению скорость потока нагретого воздуха. То есть в этом случае появляется возможность регулировать не только температуру потока, но и режим смешивания исходящего из ШКУ с подсасываемым наружным воздуха.

3.3. Система воздухоподготовки с теплообменниками, расположенными по периметру надшахтного здания

В 50–70-х годах XX века в СССР, когда высокими темпами проектировались и строились новые, восстанавливались разрушенные шахты и рудники, вопрос ресурсо- и энергосбережения при добыче полезного ископаемого не был актуальным. Ему начали уделять внимание сравнительно недавно. В дальнейшем подобный подход отразился на эффективности работы системы воздухоподготовки. Например, согласно [249], при проведении воздушно-депрессионной съемки в холодное время года на руднике БКПРУ-1 ПАО (ранее ПО) «Уралкалий» в 1988 году было установлено, что температура воздуха в стволах достигала 24–28 °C, т.е. превышала установленное минимальное значение в 12–14 раз.

В работе [250] был предложен вариант «безвентиляторной» ШКУ, когда воздух засасывается в теплообменники за счет общешахтной депрессии, создаваемой ГВУ. Однако на практике выяснилось, что в этом случае в ствол теплый воздух будет поступать только со стороны калориферного канала, а с другой стороны ствола, даже, если изолировать копер, все равно будут присутствовать инфильтрации холодного наружного воздуха.

Для решения проблемы смешиваемости потоков воздуха и с учетом опыта применения «безвентиляторных» ШКУ была предложена определенная конструкция установки [251, 252]. В этой схеме нагреваемый воздух по аналогии засасывается в ШКУ за счет общешахтной депрессии, создаваемой ГВУ, но не через калориферный канал, а через теплообменники, находящиеся в надшахтном здании (рисунок 3.11).

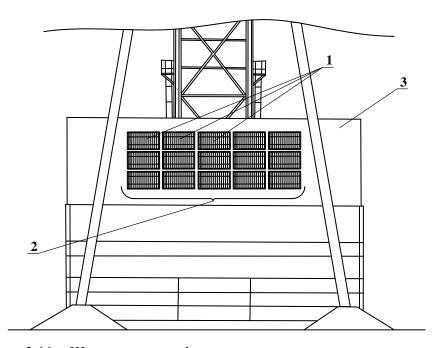


Рисунок 3.11 — Шахтная калориферная установка, расположенная в стене надшахтного здания: I — теплообменники; 2 — ШКУ; 3 — надшахтное здание

3.3.1. Тепловой расчет шахтной калориферной установки, расположенной по периметру надшахтного здания

Разработанное конструктивное решение, в котором предлагается избавиться от калориферного канала, а теплообменники располагать в стене над-шахтного здания приведено на рисунке 3.13 [251].

Однако и в этом случае проблема полностью не решается, так как ШКУ обладает рядом существенных недостатков:

- 1. Из-за расположения теплообменников только с одной стороны над-шахтного здания по сути будет повторяться проблема, возникающая при подаче воздуха в воздухоподающий ствол через калориферный канал, т.е. из-за инфильтрации холодного наружного воздуха и поступления нагретого воздуха с одной стороны в воздухоподающем ствола тепловое поле в нем будет распределяться неравномерно.
- 2. В результате расположения теплообменников в несколько рядов воздух будет проходить через нижний ряд, т.е. пойдет по пути наименьшего аэродинамического сопротивления [253]. Следовательно, через теплообменники, расположенные в нижнем ряду, пойдет почти весь воздух, а верхние ряды будут работать «вхолостую». В этом случае работа ШКУ будет не просто неэффективной, но и опасной появляется опасность заморозки трубок теплообменников, расположенных в нижнем ряду.

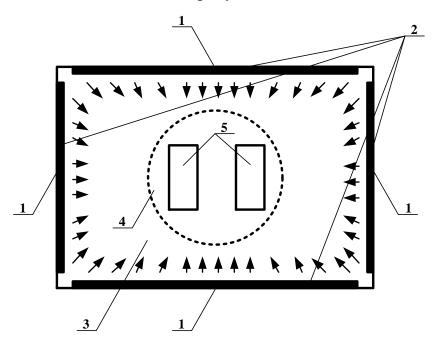


Рисунок 3.12 — ШКУ, расположенная по периметру надшахтного здания (вид сверху): 1 — теплообменники; 2 — шахтная калориферная установка; 3 — надшахтное здание; 4 — воздухоподающий ствол; 5 — скиповые окна

После устранения этих недостатков была разработана ШКУ, теплообменники которой располагаются по периметру надшахтного здания в один ряд [254,

255]. В этом случае нагретый воздух будет поступать в воздухоподающий ствол со всех сторон (рисунок 3.12). Расположение теплообменников в один ряд устраняет угрозу неравномерного распределения объемного расхода воздуха, проходящего через них. В предложенном способе инфильтрации через скиповые окна или другие технологические проемы остаются, но вследствие того, что воздух перемешивается в самом надшахтном здании при поступлении в воздухоподающий ствол он будет уже прогрет.

Определить количество и требуемую тепловую мощность теплообменников в надшахтном здании можно следующим образом.

Вентиляционная сеть подачи воздуха через вентиляционные окна представляет собой параллельное соединение, общее местное сопротивление которого согласно [256] определяется по формуле

$$R_{\text{м.общ.}} = \frac{R_{\text{м.вент.ок}}}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_{\text{м.вент.ок}}}{R_{\text{м.ск.}}}}\right)^2},$$
 (3.22)

где $R_{\text{м.вент.ок}}$ и $R_{\text{м.ск.}}$ — местные аэродинамические сопротивления вентиляционных и скиповых окон, $(H \cdot c^2)/m^8$, соответственно.

Порядок расчета данных величин в зависимости от площади сечения вентиляционных и скиповых окон соответственно, а также от их количества приведен в работе [256].

Из первого закона вентиляционных сетей суммарный объем воздуха, поступающего через вентиляционные (Q_{ok}) и скиповые (Q_{ck}) окна в воздухоподающий ствол, будет равен

$$Q_{\text{ctb}} = \sum_{i=1}^{n} Q_{\text{ok}\,i} + Q_{\text{ck}} \,. \tag{3.23}$$

Потеря давления всей системы вентиляционных окон определяется как

$$h_{\text{ok}} = R_{\text{MODIII}} \cdot Q_{\text{CIR}}^2 \,. \tag{3.24}$$

Из этого следует, что скорость и объем воздуха, проходящего через каждое i-е вентиляционное и скиповое окно, соответственно будут равны

$$v_{\text{ok}\,i} = \sqrt{\frac{h_{\text{ok}}}{R_{\text{ok}\,i} \cdot S_{\text{ok}\,i}^2}}, \text{ m/c};$$
 (3.25)

$$Q_{\text{ok}i} = v_{\text{ok}i} \cdot S_{\text{ok}i}, \, \text{M}^3/\text{c}, \qquad (3.26)$$

где $S_{\text{ок}i}$ – площадь каждого i-го вентиляционного и скипового окна, м².

Учитывая, что объем подаваемого в ствол воздуха $Q_{\text{ств}} = Q_{\text{ск}} + \sum_{i=1}^{n} Q_{\text{ок}\,i}$, а

массовое количество теплого воздуха $G_{o\kappa,i} = Q_{o\kappa,i} \cdot \rho_{o\kappa,i}$ [кг/с], получим

$$\begin{cases} Q_{\text{CTB}} = \sum_{i=1}^{n} Q_{o\kappa,i} + Q_{c\kappa} \\ \rho_{i} = \frac{0.465 \cdot p_{a}}{273.15 + T_{i}} \\ G_{o\kappa,i} = \rho_{o\kappa,i} \cdot Q_{o\kappa,i} \end{cases}$$
(3.27)

где $T_{o\kappa,i}$ и $\rho_{o\kappa,i}$ — соответственно температура (°C) и плотность (кг/м³) воздуха, поступающего i-е вентиляционное и скиповое окно.

Исходя из системы уравнений (3.27) получаем:

$$Q_{\text{CTB}} \cdot \rho_{\text{HAД, 3Д}} = Q_{\text{CK}} \cdot \rho_{\text{HAP}} + \sum_{i=1}^{n} Q_{\text{OK}, i} \cdot \rho_{\text{TEII}} ;$$

$$T_{\text{TEII}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_{\text{OK}, i} \cdot 0,465 \cdot p_{a}}{Q_{\text{OW}} \cdot \rho_{\text{TEII}} - Q_{\text{OW}} \cdot \rho_{\text{TEII}}} - 273,15,$$
(3.28)

где $T_{\text{теп}}$ — температура воздуха после теплообменников, 0 С; $\rho_{\text{нар}}$ и $\rho_{\text{над.зд.}}$ — соответственно плотность наружного воздуха и воздуха в надшахтном здании, кг/м 3 .

Необходимые для расчета количества теплообменников данные получены. Для примера тип теплообменников выбран следующий: теплообменники с пластинчатым оребрением.

Далее в расчетах используются величины, характерные для конкретного подземного горнодобывающего предприятия:

- объемная пропускная способность (массовое количество теплого воздуха $G_{\text{теп}}$, кг/ч);
- температура воздуха, входящего (холодного) в установку и исходящего из нее, 0 С ($T_{\rm x}$ и $T_{\rm теп}$);
 - температура воды на входе и выходе установки, 0 С ($T_{\text{в.н.}}$ и $T_{\text{в.к.}}$);
 - площадь фасадного сечения ШКУ F_{Φ} , м².

Расчет произведен на примере одного вентиляционного окна.

Значения температуры прямой (на входе в ШКУ) $T_{\text{в.н.}}$ и обратной (на выходе из ШКУ) $T_{\text{в.к.}}$ воды приняты соответственно равными 130 и 70 °C. Согласно [257] площадь фасадного сечения ШКУ F_{ϕ} находится как сумма площади поверхности ребер F_{p} и трубок $F_{\text{мp}}$ по формулам:

$$F_{\rm p} = \left[2 \cdot \left(\frac{b_{\rm n} \cdot H}{n_{\rm l}} - 0.785 \cdot d_{\rm 0}^2 \right) \cdot \frac{1}{u} \right] \cdot a_{\rm TO}; \qquad (3.29)$$

$$F_{\text{Mp}} = \left[3,14 \cdot d_0 \cdot \left(1 - \frac{\delta_{\text{p}}}{u} \right) \right] \cdot a_{\text{TO}}, \qquad (3.30)$$

где a_{TO} – ширина нагревательной части теплообменника, м.

Суммарная площадь для прохода теплоносителя $\sum f_{\text{ж.с.}} [\text{м}^2]$:

$$\sum f_{\text{\tiny x.c.}} = f_{\phi} \cdot \frac{\left(s_1 - d_0\right) \cdot x}{s_1 \cdot u}. \tag{3.31}$$

Остальные обозначения ясны из рисунка 3.13.

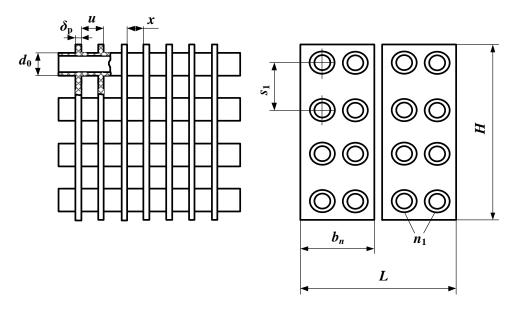


Рисунок 3.13 — Размеры отдельных элементов теплообменника с пластинчатыми ребрами

Для расчета дополнительно вычисляются следующие величины:

– температурные критерии (при нагреве) [258]:

$$\tau = \frac{(T_{\text{Teff}} - T_{x})}{(T_{\text{B.H.}} - T_{\text{B.K.}})};$$
(3.32)

$$\theta = \frac{2 \cdot (T_{\text{TEII}} - T_{x})}{(T_{\text{RH}} + T_{\text{RK}}) - (T_{\text{TEII}} + T_{x})} ; \qquad (3.33)$$

— массовая скорость воздуха в фасадном сечении ШКУ, кг/(м 2 ·с):

$$(\nu \rho)_{\phi} = \frac{G_{\text{\tiny TEII}}}{F_{\phi}}. \tag{3.34}$$

Согласно [258] массовый расход воды в теплообменнике (кг/с) определяется по формуле

$$W_{\text{TO}} = \frac{\tau \cdot G_{\text{ren}}}{4.187} \,. \tag{3.35}$$

В зависимости от схемы расположения теплообменников в ШКУ определяется компоновочный фактор ψ_y , который используется в дальнейшем для расчета требуемого количества теплообменников.

Для расчета приняты два стандартных способа размещения теплообменников в вентиляционном стволе (рисунок 3.14).

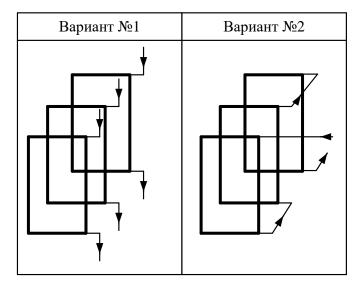


Рисунок. 3.14 – Схема установки теплообменника в вентиляционном окне

Компоновочный фактор ψ_y согласно [258] равен:

– вариант № 1:
$$\Psi_y = \frac{2267}{z_y}$$
; (3.36)

– вариант № 2:
$$\psi_{y} = 2267$$
, (3.37)

где z_y — первоначальное число рядов теплообменников по глубине ШКУ (в нашем случае =1).

Число рядов теплообменников в окне согласно [258] определяется по формуле

$$z_{y} = \frac{D \cdot \theta \cdot (\nu \rho)_{\phi}^{0.36}}{(\psi_{y} \cdot \tau)^{0.11}} , \qquad (3.38)$$

где D — коэффициент теплообменника равный для воздухонагревательных установок 7,08.

Число теплообменников z_{y} округляется до ближайшего большего значения.

Определить среднюю скорость движения теплоносителя (м/с) можно по формуле [258]:

$$\omega_{\text{вод}} = \frac{W}{\sum f_{\text{ж.с.}} \cdot \rho_{\text{B}}}, \qquad (3.39)$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, кг/м³.

Ввиду того что в ШКУ отсутствуют нагнетательные вентиляторы, необходимо знать, какое аэродинамическое сопротивление будет преодолевать проходящий через ШКУ воздух. Согласно [258] эту величину можно найти по формуле:

$$\Delta h_{y} = \left[A \cdot \left(\frac{L}{d_{_{_{9KB}}}} \right) \cdot (\nu \rho)_{\phi}^{1,7} \right] \cdot K, \qquad (3.40)$$

где A=0.0113 для неровных поверхностей и A=0.007 для тщательно изготовленных поверхностей; L — длина установки по ходу движения воздуха (см. рисунок 3.13), м; $d_{\rm экв}$ — эквивалентный диаметр трубок, м; K — коэффициент пересчета из мм вод. ст. в Па.

$$L = b_n \cdot z_v \,; \tag{3.41}$$

$$d_{_{9KB}} = \frac{2 \cdot (s - d_0) \cdot (u - \delta_p)}{(s - d_0) + (u - \delta_p)}.$$
 (3.42)

По приведенному порядку расчета определяется требуемое количество теплообменников в стенах надшахтного здания, их технические характеристики и требуемое значение температуры прямой воды, поступающей в ШКУ.

Расчетные параметры теплообменников ШКУ, их габаритные размеры и теплопроизводительность необходимы для моделирования процесса распределения теплового поля по сечению воздухоподающего ствола.

3.3.2. Тепловое распределение воздушных потоков в случае расположения шахтной калориферной установки по периметру надшахтного здания

С целью определения эффективности применения предлагаемой ШКУ, в программном пакете Soldworks был смоделирован процесс воздухоподготовки и смешивания нагретого и холодного потоков воздуха.

Результаты моделирования представлены на рисунке 3.15.

В результате моделирования процесса воздухоподготовки (рисунок 3.15) подтверждено предположение, что потоки холодного и нагретого воздуха смешиваются в надшахтном здании, и в воздухоподающий ствол поступает практически равномерно прогретый воздух. В этом случае можно констатировать следующие факты.

Предложенный способ воздухоподготовки позволит нормализовать распределение теплового поля по сечению воздухоподающего ствола, в результате чего исключается угроза нарушения герметизации межтюбинговых уплотнений и возникновения «внутристволовой естественной тяги», вызывающей в стволе образование «воздушных пробок».

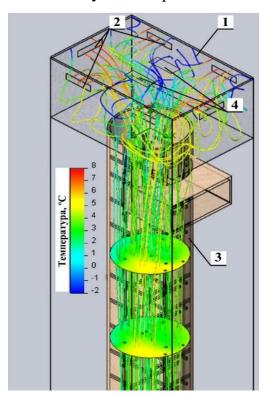


Рисунок 3.15 — Распределение теплового поля по воздухоподающему стволу при расположении ШКУ по периметру надшахтного здания: 1 — надшахтное здание; 2 — теплообменники ШКУ, расположенной по периметру надшахтного здания; 3 — воздухоподающий ствол; 4 — скиповые окна

3.4. Система воздухоподготовки при использовании воздушной завесы в воздухоподающих стволах

Широкое применение в борьбе с различными видами инфильтраций находят воздушные завесы, поэтому в исследованиях [259, 260] подобный способ

был предложен для нормализации теплового поля в воздухоподающих стволах при осуществлении воздухоподготовки (рисунок 3.16).

Эффективность работы воздушной завесы, а следовательно, процесса воздухоподготовки зависит от места ее расположения в стволе, параметров вентиляторов завесы и их взаимного расположения.

В работе [261] двусторонняя воздушная завеса использовалась для снижения утечек воздуха в воздухоподающем стволе. Причиной низкой эффективности работы воздушной завесы является то, что потоки воздуха из вентиляторов направляются встречно и препятствуют работе друг друга. В этом случае на противодействие внешним утечкам воздуха в воздушной завесе практически не остается энергии. В результате исследований установлено, что для эффективной работы воздушной завесы необходимо предотвратить препятствие для исходящих из ее вентиляторов потоков воздуха, направленных навстречу друг другу, так как они гасят большую часть своей энергии, и на противодействие утечкам ее практически не остается.

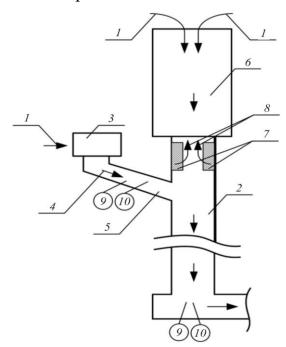


Рисунок 3.16 — Осуществление проветривания и воздухоподготовки по предлагаемому способу: a — воздушная завеса в воздухоподающем стволе; δ — воздушная завеса в вентиляционном стволе: I — наружный воздух (холодный); 2 — воздухоподающий ствол; 3 — ШКУ; 4 — нагретый воздух; 5 — калориферный канал; δ — надшахтное здание воздухоподающего ствола; 7 — воздушная завеса; 8 — воздух, выдаваемый из воздушной завесы; 9 — датчик расхода воздуха; 10 — датчик температуры, давления (или плотномер)

Решена эта проблема была за счет размещения между вентиляторами воздушной завесы перегородки. В этом случае оба воздушных потока не противодействуют друг другу, а направляются навстречу подсасываемому воздуху.

Эффективность воздушной завесы в борьбе с внешними утечками воздуха доказана в работах [261, 262]. В этих исследованиях в ходе математического моделирования (рисунок 3.17) было установлено, что при принятых условиях внешние утечки воздуха снизятся с 60,43 до 26,27 м³/с, т.е. примерно на 43,5 %, а на работу ГВУ вместо 444,36 м³/с, потребуется 409,46 м³/с.

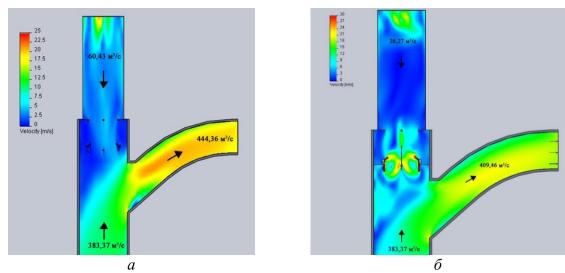


Рисунок 3.17 — Результат математического моделирования воздушных распределения воздушных потоков в вентиляционном стволе: a — без воздушной завесы в воздухоподающем стволе; δ — при использовании воздушной завесы в вентиляционном стволе

На построенной ранее модели, выполненной в программном пакете Soldworks Flow Simulation [263], был смоделирован процесс воздухоподготовки с применением воздушной завесы, режим работы которой и ее параметры определялись согласно данным работ [261, 264]. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.18.

Анализируя результаты моделирования процесса воздухоподготовки с применением воздушной завесы (рисунок 3.18, a) и без таковой (см. рисунок 3.18, δ), можно утверждать, что предлагаемый способ позволяет нормализовать распределение теплового поля по всему сечению воздухоподающего ствола и избавиться от присутствия в нем участков, где температура воздуха

близка (либо меньше) минимальной температуре +2 °C. При этом в обеих моделях режим работы ШКУ оставался тем же.

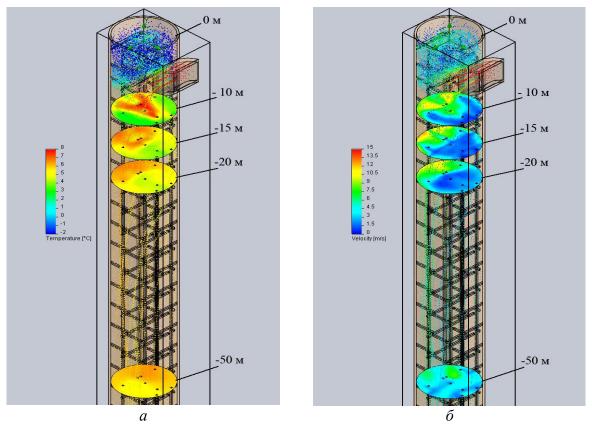


Рисунок 3.18 — Распределение температуры воздуха по сечению воздухоподающего ствола на разных глубинах путем смешивания холодного и теплого воздуха при использовании воздушной завесы, установленной в устье ствола: холодный воздух -20 °C ($20 \text{ m}^3/\text{c}$), теплый воздух +8 °C ($147 \text{ m}^3/\text{c}$): a — при использовании воздушной завесы в вентиляционном стволе; δ — без воздушной завесы в воздухоподающем стволе

Таким образом, не изменяя способ проветривания и не производя реконструкции ШКУ, возможно обеспечить требуемый режим воздухоподготовки и исключить при этом возникновение в воздухоподающих стволах «воздушных пробок», снизив при этом затраты энергоресурсов.

3.5. Использование дымовых газов с целью повышения эффективности при воздухоподготовке

Подавляющее большинство ШКУ, применяемых на подземных горнодобывающих предприятиях, используют в качестве теплоносителя воду, подаваемую с котельной установки, на нагрев которой расходуется значительное количество природного газа [265–267]. В результате этого в общих затратах на добычу полезного ископаемого доля затрат, связанных с нагревом воздуха в холодный период года, достигает 30 % [199, 268]. Так, в отопительный период 2012/2013 годов (5 месяцев) на нагрев воды для ШКУ на руднике БКПРУ-2 (ПАО «Уралкалий») было израсходовано 2547,5 тыс. м³ природного газа [269]. Следовательно, существует проблема значительного потребления энергоресурсов при осуществлении воздухоподготовки.

Ввиду того что теплопроизводительность ШКУ рассчитывается для максимально холодного времени года, в весенне-осенний период, когда температура наружного воздуха мала, но производить воздухоподготовку все равно необходимо, появляется уже описанная выше проблема «перегрева» воздуха, подаваемого в воздухоподающие стволы, и сопутствующие ей проблемы, связанные с возникновением нештатных ситуаций. Для решения указанной проблемы необходимо найти источник энергии, позволяющий нагревать теплоноситель, подаваемый в ШКУ, до меньшего значения, но с сохранением условий безопасности.

3.5.1. Способ нагрева воды, подаваемой в систему воздухоподготовки

В современном мире существует тенденция к все большему использованию во всех областях промышленности и производства вторичных и возобновляемых источников энергии [270–274]. К возобновляемым источникам относятся: энергия ветра (потока воздуха) [275, 276] и тепловая энергия воздуха [49, 50], а также геотермальная энергия в недрах земли [277–281] и т.д. К вторичным источникам энергии относятся такие как энергия нагретой в ТЭЦ воды [282, 283] и энергия сточных шахтных вод [284, 285] и т.д.

Вторичным источником энергии являются дымовые газы, образующиеся в процессе работы котельной установки. В связи с тем что котельные установки в обязательном порядке присутствуют на каждом подземном горнодобывающем предприятии (для обогрева административных зданий, для работы обогатительной фабрики, сушилок и т.д.), этот источник энергии будет доступен для использования.

В работе [286] предложено использовать тепло дымовых газов котельной установки для повышения энергоэффективности работы ШКУ.

Способ нагрева воды, которая после этого будет подаваться в ШКУ, представлен на структурной схеме (рисунок 3.19).

Теплоноситель поступает в систему от источника водоснабжения, которым могут быть сточные или грунтовые воды, вода из водоемов (после очистки) и т.д. После измерения всех параметров теплоноситель (воды) поступает в резервуар, в котором расположен теплообменник. По теплообменнику проходят дымовые газы, поступающие с котельной установки, закачиваемые в него при помощи дутьевых вентиляторов.

Ввиду того что при движении дымовых газов по теплообменнику они остывают, нагрев воды в резервуаре осуществляется неравномерно. Поэтому в нем предусматривается способ перемешивания жидкости: пропеллерная мешалка или пневматическое перемешивание по системе «джакузи» (рисунки 3.20, 3.21).

Нагретая вода из резервуара через камеру смешивания поступает в трубопровод, снабжающий ШКУ теплоносителем. При этом параметры воды контролируются при помощи датчиков. Если температура нагретой воды в резервуаре будет низкой, недостаточной для подачи ее в систему теплоснабжения ШКУ, то она направится обратно в резервуар.

В зависимости от параметров наружного воздуха и степени нагрева воды в резервуаре, работа ШКУ может обеспечиваться только из предлагаемой системы или с применением воды с котельной установки.

3.5.2. Тепловой расчет теплообменника

Расчет теплообменника произведен для следующих параметров резервуара, воды и дымовых газов:

- размеры резервуара: длина и ширина соответственно $a \times b = 5 \times 5$ м, высота $h_{\text{3M}} = 3$ м, диаметр мешалки d = 0.5 м, частота ее вращения n = 1 с⁻¹;
 - температура воды на входе в резервуар $T_{\rm B1} = 10\,{\rm ^{\circ}C};$
 - температура дымовых газов T_{r1} = 180 °C.

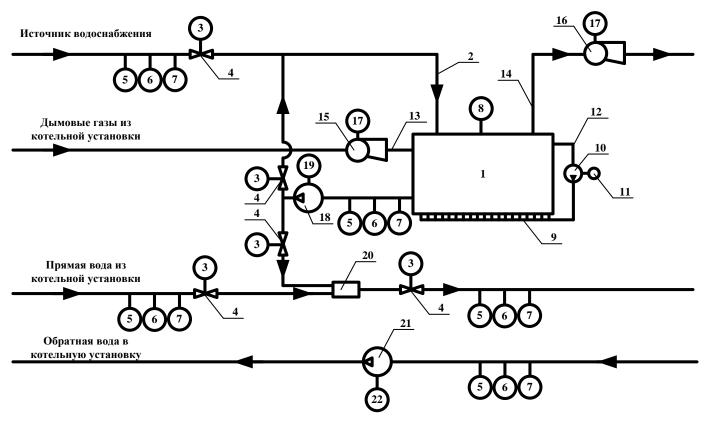


Рисунок 3.19 — Общий вид схемы автоматизации подогрева воды дымовыми газами: 1 — теплообменник; 2 — трубопровод для подачи воды; 3 — устройство управления задвижкой; 4 — управляемая задвижка; 5 — датчик температуры; 6 — датчик расхода; 7 — датчик давления; 8 — датчик уровня воды; 9 — пневматический перемешиватель воды («джакузи»); 10 — компрессор; 11 — устройство управления компрессором; 12 — воздуховод; 13 — входной трубопровод для дымовых газов котельной установки; 14 — выходной трубопровод для дымовых газов котельной установки; 15, 16 — дутьевые вентиляторы; 17 — устройство управления дутьевым вентилятором; 18 — циркуляционный насос; 19 — устройство управления циркуляционным насосом; 20 — камера смешивания; 21 — сетевой насос для обратной воды; 22 — устройство управления сетевым насосом

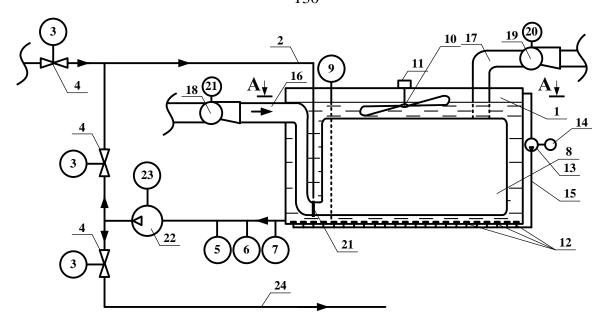


Рисунок 3.20 — Подача дымовых газов в теплообменник: I — резервуар для подогрева воды; 2 — трубопровод для подачи воды; 3 — устройство управления задвижкой; 4 — управляемая задвижка; 5 — датчик температуры; 6 — датчик расхода; 7 — датчик давления; 8 — змеевик; 9 — датчик уровня воды; 10 — пропеллерная мешалка; 11 — устройство управления пропеллерной мешалкой; 12 — пневматический перемешиватель воды («джакузи»); 13 — компрессор; 14 — устройство управления компрессором; 15 — воздуховод; 16 — входной трубопровод для дымовых газов котельной установки; 17 — выходной трубопровод для дымовых газов котельной установки; 18, 19 — дутьевые вентиляторы; 20 — устройство управления дутьевыми вентиляторами; 21 — устройство для съема змеевика; 22 — циркуляционный насос; 23 — устройство управления циркуляционным насосом; 24 — трубопровод для подачи нагретой воды в камеру смешения

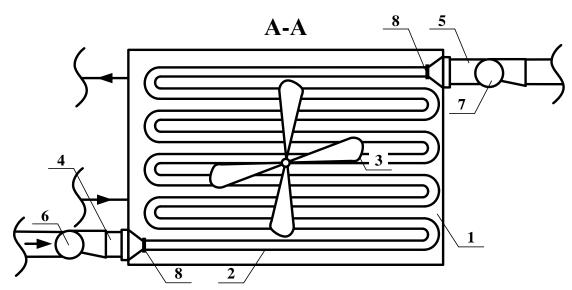


Рисунок 3.21 — Теплообменник (вид сверху) в разрезе: I — резервуар для подогрева воды; 2 — змеевик; 3 — пропеллерная мешалка; 4 — входной трубопровод для дымовых газов котельной установки; 5 — выходной трубопровод для дымовых газов котельной установки; 6, 7 — дутьевые вентиляторы; 8 — устройство для съема змеевика

Тепловой поток, выделяемой с 1 м^2 площади змеевика, определяется по формуле [238, 287]:

$$q_{\rm 3M} = k\Delta T, \tag{3.43}$$

где ΔT — температурный напор в теплообменнике с однократным перекрестным ходом, определяемый по формуле:

$$\Delta T = \Delta \overline{T} \cdot \varepsilon_{\Lambda T}, \tag{3.44}$$

где $\Delta \overline{T}$ — усредненное значение температурного напора по всей поверхности теплообменника, °C; $\epsilon_{\Delta T}$ — поправочный коэффициент.

При принятых значениях температуры воды и дымовых газов на входе для нагрева воды, например до $T_{\rm B2} = 60\,^{\circ}{\rm C}$, при охлаждении дымовых газов до $T_{\rm r2} = 100\,^{\circ}{\rm C}$ находится необходимое значение температурного напора по формуле [238]:

$$\Delta \overline{T} = \frac{\Delta T_6 - \Delta T_{\text{M}}}{2,3 \ln \frac{\Delta T_6}{\Delta T_{\text{M}}}} = 39,0 \, ^{\circ}\text{C},$$

где ΔT_6 и $\Delta T_{\rm M}$ — соответственно большая и меньшая разность температур воды и дымовых газов: $\Delta T_6 = T_{\rm r1} - T_{\rm B1}$ и $\Delta T_{\rm M} = T_{\rm r2} - T_{\rm B2}$.

При значении поправочного коэффициента $\epsilon_{\Delta T}=0.95$ по формуле (3.44) находим $\Delta T=37.1$ °C.

Коэффициент теплопередачи определяется по формуле:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\rm r}} + \frac{\delta_{\rm cr}}{\lambda_{\rm cr}} + \frac{1}{\alpha_{\rm B}}},\tag{3.45}$$

где $\alpha_{\scriptscriptstyle \Gamma}$ и $\alpha_{\scriptscriptstyle B}$ — коэффициенты теплоотдачи соответственно дымовых газов и воды в резервуаре, ${\rm BT/(m^2 \cdot K)};\; \delta_{\scriptscriptstyle CT}$ — толщина стенки змеевика, м; $\lambda_{\scriptscriptstyle CT}$ — коэффициент теплопроводности материала, из которого выполнен змеевик, ${\rm BT/(m \cdot K)}.$

Величина коэффициента теплоотдачи от воды находится по формуле:

$$\alpha_{_{\rm B}} = \frac{\mathrm{Nu_{_{\rm B}} \cdot \lambda_{_{\rm B}}}}{D_{_{_{\rm 9KB,\,B}}}},$$

где $\lambda_{\scriptscriptstyle B}$ – коэффициент теплопроводности воды в резервуаре, ${\rm Br/}({\rm M}\cdot{\rm K});$

$$D_{_{\text{ЭКВ. В}}} = \frac{2ab}{(a+b)}$$
 — эквивалентный диаметр резервуара, м;

$$Nu_{_{B}}=0.87\!\!\left(\!\frac{\mu_{_{B}}}{\mu_{_{CT}}}\!\right)^{\!0.14}\,Re_{_{B}}^{0.62}\,Pr_{_{B}}^{^{1/3}}\,-$$
число Нуссельта; $\mu_{_{B}}$ и $\mu_{_{CT}}-$ динамическая вяз-

кость воды, определяемая соответственно по средним температурам воды и стенки, Па·с.

Число Рейнольдса для перемешиваемой воды согласно [288] находится по формуле:

$$Re_{_{B}} = \frac{\rho_{_{B}} \cdot n \cdot d^{2}}{\mu_{_{B}}},$$

где $\rho_{\scriptscriptstyle B}$ – плотность воды, кг/м³.

При заданной температуре жидкости число Прандтля можно найти по табличным данным работы [238].

Полученные расчетные данные по воде в резервуаре для рассматриваемого примера, полученные формулам [238, 288], приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Расчетные и табличные значения нагретой в резервуаре воды

Параметр	Tв, °С	$\rho_{\rm B}$, kg/m ³	μ _в , Па∙с	λ _B , Bτ/(м·K)	Nu _B	Re _B	Pr _B
Численное значение	60	983,1	$0,48\cdot10^{-3}$	$65,9\cdot10^{-3}$	4602	5,1·10 ⁵	3,0

Полученное значение числа Рейнольдса характеризует турбулентный режим перемешивания воды в резервуаре. Соответствующий коэффициент теплоотдачи от воды $\alpha_{\text{в}} = 606~\text{Bt/(m}^2 \cdot \text{K})$.

Для определения безразмерного коэффициента теплоотдачи дымовых газов (числа Нуссельта) используется уравнение М.А. Михеева:

$$Nu_r = 0.021Re_r^{0.8}Pr_r^{0.43}\left(\frac{Pr_r}{Pr_{cr}}\right)^{0.25}$$

где Pr_{r} и Pr_{cr} – числа Прандтля дымовых газов соответственно при температурах дымовых газов и для стенки змеевика.

При турбулентном движении газа в изогнутом канале возникают центробежные силы, создающие в поперечном сечении циркуляционные токи (вторичная циркуляция). С учетом этих особенностей число Нуссельта согласно [238] уточняется по формуле

$$Nu_{\Gamma}^* = Nu_{\Gamma} \cdot \varepsilon_{\mu_{3\Gamma}}, \qquad (3.46)$$

где $\varepsilon_{\text{изг}}$ – поправочный коэффициент для труб в виде змеевиков, зависящий от внутреннего диаметра трубы с эквивалентным диаметром (в нашем случае $r_{\text{тр}} = D_{\text{экв. r}} = 0,375 \text{ м}$) и радиуса закругления змеевика $R_{\text{зм}}$. Значение $R_{\text{зм}}$ в расчетах было принято равным 0,3 м.

Тогда поправочный коэффициент $\varepsilon_{\text{изг}}$ при принятых параметрах змеевика определяется по формуле [238]:

$$\varepsilon_{_{\mathrm{MSF}}}=1+1,8\frac{D_{_{\mathrm{9KB.F}}}}{R_{_{\mathrm{3M}}}},$$

Расчетные и табличные значения дымовых газов в змеевике приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 — Расчетные и табличные значения дымовых газов в змеевике теплообменника

Параметр	T _B , °C	$\rho_{\rm b}$, kg/m ³	μ _в , Па∙с	λ _B , Bτ/(м·K)	Nu _B	Re _B	Pr _B
Численное	180	0,8	$24,0\cdot10^{-6}$	1,09	0,375	$4.0 \cdot 10^{-2}$	0,67
значение		- , -		-,00	0,000	1,0 -0	, , , ,

В таблице 3.4 приняты следующие обозначения: μ_{Γ} – динамическая вязкость дымовых газов, Па·с; c_{Γ} – удельная теплоемкость дымовых газов [288];

$$D_{_{_{_{_{_{_{_{3_{\mathrm{M}}}}}}}}}} = \frac{2h_{_{_{_{3_{\mathrm{M}}}}}}d_{_{_{_{3_{\mathrm{M}}}}}}}{\left(h_{_{_{3_{\mathrm{M}}}}} + d_{_{_{3_{\mathrm{M}}}}}\right)}$$
 — эквивалентный диаметр змеевика; $h_{_{_{3_{\mathrm{M}}}}}$, $d_{_{3_{\mathrm{M}}}}$ — соответственно

высота змеевика и расстояние между его внутренними стенками, принятые равными $h_{\rm 3M}=3$ м и $d_{\rm 3M}=0.2$ м; $\lambda_{\rm T}$ – коэффициент теплопроводности дымовых газов в змеевике теплообменника, ${\rm BT/(m\cdot K)}.$

При скорости движения дымовых газов в змеевике $v_{\rm r}=10$ м/с число Рейнольдса ${\rm Re}_{\rm r}=1,\!17\cdot10^5$ также характеризует турбулентный режим перемешивания.

Исходя из формул (3.46) $\mathrm{Nu}_{_{\Gamma}}^*=643,$ а коэффициент теплоотдачи $\alpha_{_{\Gamma}}=68,6~\mathrm{BT/(m^2\cdot K)}.$

Для принятых значений коэффициент теплопередачи, определяемый по формуле (3.45), $k = 61.4 \, \mathrm{Bt/(m^2 \cdot K)}$, а плотность теплового потока, определяемая по формуле (3.43), $q_{\rm 3M} = 2278 \, \mathrm{Bt/m^2}$.

Тогда общий тепловой поток для принятых исходных данных [238]:

$$Q = q_{\scriptscriptstyle 3M} F_{\scriptscriptstyle 3M}, \tag{3.47}$$

где $F_{\rm 3M}$ — площадь поверхности змеевика, равная для принятых исходных данных $F_{\rm 3M}$ = 58,88 м².

Окончательное значение теплового потока по формуле (3.47) для резервуара с водой размерами 5×5 м и расположенным в нем змеевиком высотой $h_{\rm 3M}$ = 3 м, с расстоянием между внутренними стенками 0,2 м при скорости движения и температуре дымовых газов, соответственно равных 10 м/с и 180 °C, составит 134,1 кВт.

3.5.3. Обоснование применения предлагаемой системы

В период, когда температура наружного воздуха близка к значению +2 °C, отопительный сезон продолжается. Рассчитанные на максимально отрицательные температуры воздуха теплообменники в это время должны работать либо на малом расходе теплоносителя, либо температура его должна быть снижена довольно значительно.

В связи с тем что температура обратной воды и объемный расход имеют ограничения по своему минимальному значению, теплообменники нагревают воздух до гораздо больших, чем требуется, параметров [249, 289].

За счет использования в предлагаемой системе воды, нагретой дымовыми газами в резервуаре, и камеры смешивания можно обеспечить нужную

температуру и объемный расход воздуха при соблюдении параметров обратной воды. Объемный расход теплоносителя, подаваемого с котельной установки, при этом будет снижен, что позволит сэкономить энергетические затраты на работы ШКУ.

Таким образом, предлагаемая система позволит в осенне-весенние периоды обеспечить нагрев воздуха в воздухоподающих стволах до требуемой температуры и сэкономить при этом затраты на энергоресурсы.

3.6. Выводы по главе

В ходе проведения исследований получены следующие результаты:

- 1. Посредством математического моделирования установлены причины низкой эффективности существующих способов воздухоподготовки.
- 2. Установлена причина возникновения «воздушных пробок» в шахтных стволах при осуществлении воздухоподготовки в холодное время года и даны рекомендации по локализации этого негативного и опасного явления.
- 3. Описан способ управления проветривания, учитывающий действие общерудничной естественной тяги, величиной которой можно управлять за счет регулирования режима работы ШКУ и прогнозируемых параметров наружного воздуха.
- 4. Разработаны способы воздухоподготовки и новые конструкции ШКУ, позволяющие существенно повысить эффективность настоящего процесса (примерно на 11-18%) и обеспечить при этом равномерный прогрев поступающего в рудник (шахту) воздуха, что позволит исключить опасные ситуации, связанные с обледенением крепи в воздухоподающих стволов.
- 5. Разработана система автоматической подачи в ШКУ воды, нагретой за счет дымовых газов котельной установки, обязательно присутствующей на любом подземном горнодобывающем предприятии.

ГЛАВА 4. УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ВОЗДУХА В НОРМАЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ УСЛОВИЯХ

Подача в рудник (шахту) требуемого объема воздуха не гарантирует того, что все рабочие зоны будут проветриваться в штатном режиме. Для этого требуется регулировать воздушные потоки в горных выработках. Как известно, для этой цели используются «положительный» способ, когда при помощи вентиляторов воздух подают в горные выработки, и «отрицательный», при котором ограждаются выработки, не предназначенные для проветривания.

В зависимости от целесообразности применения в каждой отдельной ситуации выбирается один из указанных способов регулирования воздухораспределением.

4.1. Средства и способы регулирования воздухораспределения в нормальном режиме проветривания (на примере калийных рудников)

Большая протяженность горных выработок и наличие значительного объема выработанных пространств делает процесс доставки воздуха в рабочую зону удаленных участков проблематичным. При изолировании участков, находящихся ближе к воздухоподающим стволам, вентиляционным шахтным перемычкам, и наращивание при этом производительности ГВУ приведет к увеличению статического давления на эти изолирующие устройства и, как следствие, проходу через них воздуха. В этом случае рационально использовать подземные вспомогательные вентиляционные установки (ПВВУ). Однако, ввиду того что на их работу расходуется значительное количество электроэнергии, применять их нужно только на удаленных участках рудника и с учетом регулирования производительности ГВУ.

На рисунках 4.1 и 4.2 показаны соответственно внешний вид ПВВУ и компановка выработок, примыкающих к ней, на руднике БКПРУ-2 (ПАО «Уралкалий»).



Рисунок 4.1 – Внешний вид подземной вентиляторной установки

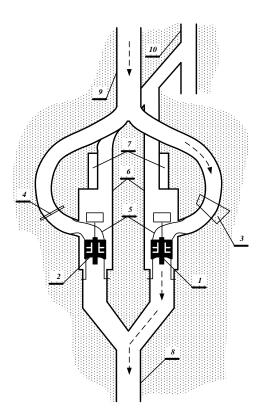
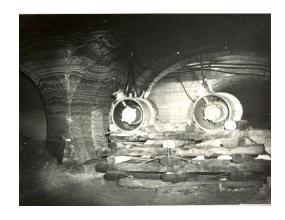


Рисунок 4.2 – Компоновка выработок подземной вентиляторной установки (рудник БКПРУ-2)

К ПВВУ, способным эффективно осуществлять подачу воздуха в удаленные участки, относятся подземные вентиляторные установки (см. рисунки 4.1 и 4.2) [290] и эжектирующие установки [99, 102, 104, 291] (рисунок 4.3).



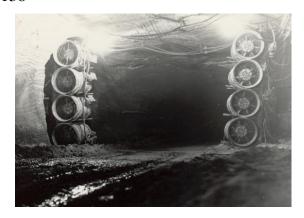


Рисунок 4.3 — Эжектирующая установка: a — в транспортном штреке рудника БКПРУ-1; δ — в транспортном штреке рудника БКПРУ-2

После того как указанными ПВВУ воздух будет доставлен в удаленные рабочие участки, в них необходимо производить перераспределение воздушных потоков при помощи отрицательного способа регулирования воздухораспределения, но учетом действующих между выработками естественных тяг.

4.1.1. Способ проветривания добычных участков при обратном порядке отработки полезного ископаемого

Отработка панелей калийных рудников осуществляется двумя способами: от конца панели к ее началу – обратный и от начала панели к ее концу – прямой порядок отработки.

Несмотря на большие трудозатраты по подготовке добычных участков, обратный ход отработки имеет существенное преимущество по сравнению с прямым порядком отработки. Преимущество заключается в том, что при обратном ходе отработки «потери» воздуха значительно ниже, так как воздух идет в рабочие камеры по пути наименьшего аэродинамического сопротивления: преодолевает участок транспортного штрека от точки 1 до точки 2 и далее направляется в рабочие камеры (к точкам 4 и 5), как показано на рисунке 4.4, а. Этот участок имеет меньшее аэродинамическое сопротивление по сравнению с участком от точки 1 до точки 3 (см. рисунок 4.4, а), следовательно, практически весь свежий воздух будет попадать в рабочие камеры, минуя отработанные.

При прямом порядке отработки камеры начинают отрабатывать от начала панели (блока), поэтому воздух через отработанные камеры стремится направиться в вентиляционный штрек, а не в рабочие камеры (рисунок $4.4, \delta$). С целью преграждения пути движения воздуха через отработанные камеры в них устанавливаются шахтные вентиляционные перемычки.

Существующие шахтные вентиляционные перемычки не способны полностью герметизировать отработанные камеры длительное время. В связи с этим через них наблюдаются утечки воздуха в вентиляционный штрек. Значение утечек через одну перемычку не велико, но в совокупности (камер может быть более 100) на панель (блок) общий объем утечек становится существенным.

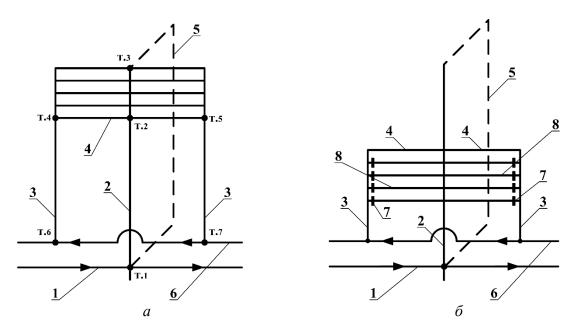


Рисунок 4.4 — Упрощенные схемы проветривания панелей при обратном (a) и прямом (δ) ходе отработки: I — главный транспортный штрек; 2 — панельный транспортный штрек; 3 — вентиляционный штрек; 4 — рабочие камеры; 5 — конвейерный штрек; 6 — главный вентиляционный штрек; 7 — шахтная вентиляционная перемычка; 8 — отработанные камеры

Для исключения возможности возникновения подобной ситуации в панелях, отрабатываемых прямым ходом, в работе [292] была предложена схема проветривания, приведенная на рисунке 4.5.

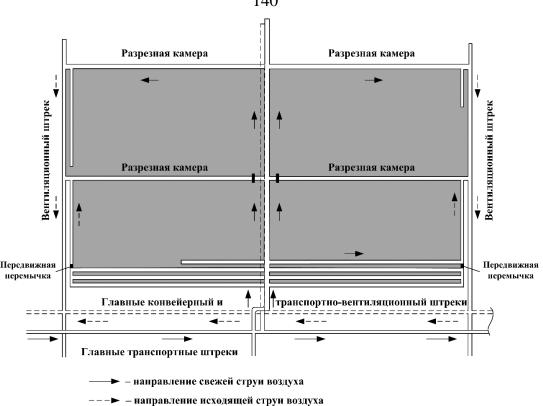


Рисунок 4.5 – Схема подготовки и отработки пласта панели, отрабатываемой прямым ходом (вид сверху)

При подобной схеме отработки панель разбивается на блоки разрезными камерами, как показано на рисунках 4.5 и 4.6. Отработка панели ведется от ее начала. Проветривание осуществляется следующим образом.

Свежий воздух с главного транспортного штрека 1 поступает в панельный транспортный штрек 7 (см. рисунок 4.6). В отработанные камеры 9 воздух практически не поступает, так как его проходу и удалению его в дополнительный вентиляционный штрек 8 препятствует передвижная шахтная вентиляционная перемычка 5. Ввиду того что наименьшее аэродинамическое сопротивление на пути движения воздуха будет создаваться в случае его прохождения через отрабатываемую камеру 6, свежий воздух поступит в рабочую зону. При проходе камеры первым ходом комбайна (см. рисунок 4.5) воздух в рабочую зону будет нагнетаться при помощи вентилятора местного проветривания (ВМП) и далее по панельному транспортному штреку 7 будет удаляться в разрезную камеру второго блока 10 и далее в панельный вентиляционный штрек 4.

Прямому проходу воздуха из панельного транспортного штрека 7 в панельный вентиляционный штрек 4 через разрезные камеры первого блока 3 будут препятствовать глухие перемычки 11.

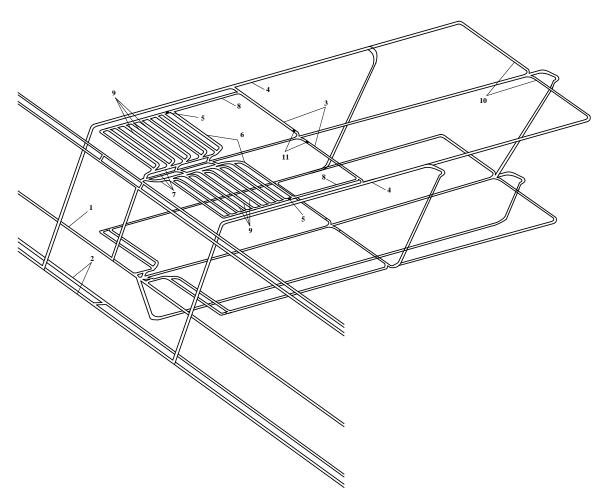


Рисунок 4.6. — Схема подготовки и отработки панели, отрабатываемой прямым ходом (аксонометрия): I — главный транспортный штрек; 2 — главный конвейерный и транспортновентиляционный штреки; 3 — разрезная камера первого блока; 4 — панельный вентиляционный штрек; 5 — передвижная шахтная вентиляционная перемычка; 6 — отрабатываемые камеры; 7 — панельный транспортный штрек; 8 — дополнительный вентиляционный штрек; 9 — отработанные камеры; 10 — разрезная камера второго блока

Отличие данной схемы заключается в том, что ограждать необходимо не каждую камеру, а отработанный участок в вентиляционном штреке. В этом случае возникновение утечек воздуха практически исключается. Для изолирования отработанного участка в вентиляционном штреке необходимо предусмотреть переносную шахтную вентиляционную перемычку, которая будет перемещаться к разрезной камере блока.

4.1.2. Способ проветривания добычных участков при обратном порядке отработки полезного ископаемого

По мере отработки шахтного поля длина, сечение, а иногда конфигурация горных выработок изменяются, т.е. варьируется их аэродинамическое сопротивление. Также в добычных участках присутствуют источники тепла, в результате действия которых изменяются величины (а иногда направление) действующих между выработками естественных тяг (см. п. 1.4.2). Ввиду того что калийные рудники обладают малыми аэродинамическими сопротивлениями [231, 293], при разработке схем проветривания необходимо учитывать влияние на воздухораспределение всех факторов.

Анализ, проведенный в главе 1, показал, что ранее предложенный способ проветривания имеет некоторые недостатки при отработке добычного участка на начальном и конечном этапах, связанные с соответственно малыми и значительными величинами естественных тяг $h_{\rm e2}$ и $h_{\rm e3}$ (рисунок 1.8).

Для решения этой проблемы предложено на этих этапах отработки в транспортном (выемочном) штреке устанавливать переносную шахтную вентиляционную перемычку (рисунок 4.7, a). На конечном этапе перемычка будет препятствовать рециркуляции отработанного воздуха (рисунок 4.7, δ).

Для того чтобы определить периоды возведения перемычки, необходимо произвести предварительные расчеты [294].

На этапе подготовки добычного участка предварительно осуществляют расчет минимального и максимального значения естественной тяги $h_{\rm e\ min}$ и $h_{\rm e\ max}$, соответственно, возникающих между выемочным штреком и вентиляционными сбойками, а также между выемочным и заглубленным конвейерно-вентиляционным штреками, как функций от минимальной $h_{\rm e\ min} = f\left(\Delta H_{min}\right)$ и максимальной $h_{\rm e\ max} = f\left(\Delta H_{max}\right)$ величин разностей высотных отметок между местом отработки рабочих камер 1 и местом выхода воздуха из выемочного штрека в уклон 4 ΔH_{min} и ΔH_{max} соответственно (рисунок 4.8).

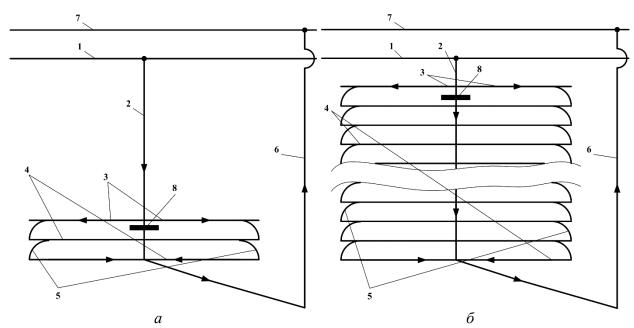


Рисунок 4.7 — Упрощенная схема проветривания выемочного участка по предлагаемому способу: a — начальный этап отработки; δ — конечный этап отработки; I — транспортный штрек; 2 — выемочный штрек; 3 — рабочие камеры; 4 — отработанные камеры; 5 — вентиляционные сбойки; δ — заглубленный конвейерно-вентиляционный штрек; δ — вентиляционный штрек; δ — шахтная вентиляционная перемычка; δ — уклон

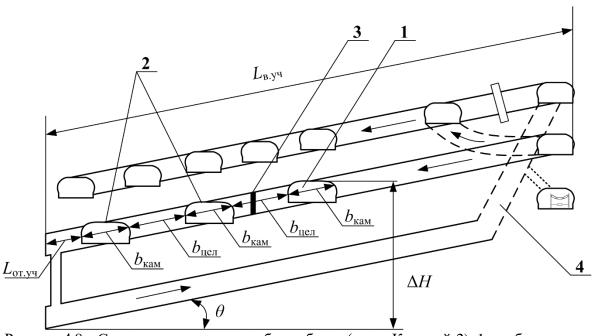


Рисунок 4.8 — Схема подготовки и отработки блока (пласт Красный-2): 1 — рабочие камеры; 2 — отработанные камеры; 3 — шахтная вентиляционная перемычка; 4 — уклон

Величины ΔH_i рассчитывают в зависимости от количества парных отработанных камер 2 и рабочих камер 1 (см. рисунок 4.8) по следующим формулам:

$$\Delta H = L_{\text{в.уч}} - \left(L_{\text{в.уч}} - \left(L_{\text{от.уч}} + 2b_{\text{кам}} + b_{\text{цел}}\right)\right) \cdot \sin\theta \text{ при } N_{\text{пар.кам}} = 2; \tag{4.1}$$

$$\Delta H = L_{\text{в.уч}} - \left(L_{\text{в.уч}} - N_{\text{пар.кам}} \left(b_{\text{кам}} + b_{\text{цел}}\right)\right) \cdot \sin \theta \text{ при } N_{\text{пар.кам}} > 2, \tag{4.2}$$

где $N_{\text{пар.кам}}$ — количество парных отработанных камер 2 и рабочих камер l; $L_{\text{в.уч}}$ — длина выемочного участка; $L_{\text{от.уч}}$ — длина отработанного участка за вентиляционными сбойками; $b_{\text{кам}}$ — ширина отработанных камер; $b_{\text{цел}}$ — ширина целика; θ — угол падения пласта.

В расчетах учитывается изменяющееся абсолютное значение естественной тяги $h_{\rm e1}$, увеличивающей общий объем воздуха, поступающего в выемочный участок.

В этом случае шахтная вентиляционная перемычка должна обладать свойствами быстрого ее возведения, перемещения на новое место и возможностью быстрого разбора при соблюдении качественных вентиляционных свойств.

Однако следует учитывать, что при расчетах минимальной ($h_{\rm e}$ $_{min}$) и максимальной ($h_{\rm e}$ $_{max}$) естественных тяг принимается во внимание только угол наклона добычного участка относительно горизонта и не учитывается угол наклона отработанных и отрабатываемых камер относительно оси выемочного штрека. Тогда в таких добычных участках необходимо применять технологическое решение, представленное в работе [295].

В этом случае также предварительно осуществляется расчет минимальной и максимальной значений естественных $h_{\rm e\,\it min}$ и $h_{\rm e\,\it max}$. Однако при расчетах учитывается угол наклона (γ) камер 1 относительно центральной оси выемочного штрека 2 (рисунок 4.9). В результате расчетов выбираются участки отработки выемочного участка, на которых требуется проветривание с применением вентиляторов местного проветривания (ВМП) 3 и без их применения. В этом случае заранее можно задать режимы управления работой ВМП, в результате чего на этапе отработки панели (блока) появится возможность эффективно осуществлять его проветривание.

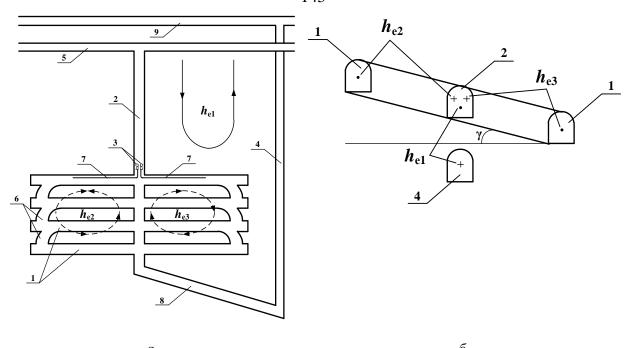


Рисунок 4.9 — Упрощенная схема проветривания выемочного участка по предлагаемому способу: a — вид сверху; δ — боковой разрез выемочного участка; 1 — камеры; 2 — выемочный штрек; 3 — ВМП; 4 — заглубленный конвейерно-вентиляционный штрек; 5 — транспортный штрек; δ —вентиляционные сбойки; 7 — трубопроводы; δ — уклон; δ — вентиляционный штрек

Представленные способы позволяют эффективно проветривать добычные участки калийных рудников в случае использования в них быстровозводимой шахтной вентиляционной перемычки.

4.1.3. Описание предлагаемой конструкции быстровозводимой шахтной вентиляционной перемычки

Проведенный ранее анализ показал, что с позиции изоляционных свойств лучшими являются воздушные ШВП (см. рисунок 1.5). К их недостаткам относятся длительность возведения, когда требуется закачка воздухом до рабочего состояния (до 1,5 часа) и необходимость источника, позволяющего вырабатывать такой объем воздуха (до 2000 л).

При разработке ШВП нового типа использовались преимущества воздушных перемычек и устранены их недостатки следующим образом [296].

Ввиду того что изоляционные свойства воздушной ШВП необходимы только в местах ее соприкосновения с горной выработкой, основное сечение

изолируемого участка можно перекрыть полотном, а по периметру перемычки разместить пневморукав.

В этом случае предлагаемое устройство обеспечит надежную изоляцию горной выработки при малом объеме закачиваемого воздуха. На возведение устройства потребуется существенно меньшее количество времени. Один из вариантов указанного технического решения представлен на рисунке 4.10. Конструкция разработанной ШВП позволит обеспечивать быстрое ее возведение и перемещение на новое место.

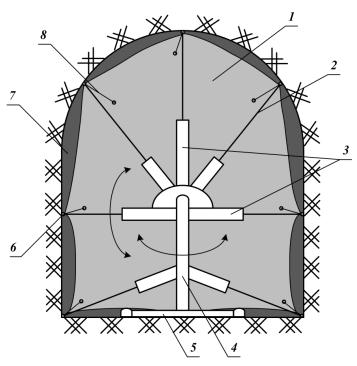


Рисунок 4.10 — Принципиальное техническое решение по конструкции воздушной ШВП:

1 – полотно; 2 – телескопические упоры; 3 – вращающиеся мачты; 4 – армирующий каркас; 5 – салазки; 6 – крепежные кольца; 7 – пневморукав; 8 – застежки

Под конфигурацию калийных рудников была разработана шахтная вентиляционная перемычка, представленная на рисунке 4.11.

В конструкцию шахтной вентиляционной перемычки входит основание перемычки (см. рисунок 4.11, a), состоящее из лыжных салазок или лыжероллеров, на которых установлен каркас с раздвигающимися частями для растягивания полотна, перекрывающего основное сечение выработки.

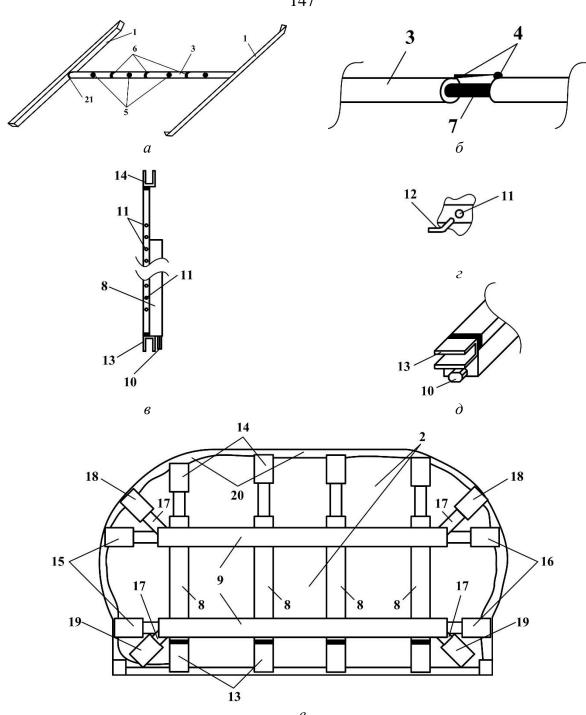


Рисунок 4.11 — Конструкция воздушной ШВП, разработанной для калийных рудников a — основание; δ — вращающаяся штанга в раздвинутом положении; ϵ — вертикальная стойка; ϵ — крепление вертикальной стойки; ϵ — нижняя часть вертикальной стойки; ϵ — вертикальное положение перемычки; ϵ — выразные салазки или лыжероллеры; ϵ — полотно; ϵ — вращающаяся штанга; ϵ — крепеж; ϵ — вырез-крепеж; ϵ — разрез; ϵ — дополнительная штанга; ϵ , ϵ — стойки; ϵ — шкив; ϵ — отверстие; ϵ — крепления; ϵ — крепления; ϵ — пазы; ϵ — вращающиеся стойки; ϵ — пневморукав; ϵ — крепеж

Между лыжными салазками или лыжероллерами установлена вращающаяся штанга (см. рисунок 4.11, δ), имеющая крепеж в месте соединения с лыжными салазками и вырезы-крепежи. Крепеж фиксирует вращающуюся штангу

в положении, когда вырезы-крепежи направлены строго вверх (ось вырезов-крепежей перпендикулярна лыжным салазкам).

Каркас с раздвигающими частями выполнен в виде вертикальных стоек и прикрепленных к ним горизонтальных стоек (см. рисунок 4.11, в).

Каждая стойка состоит из скрепленных между собой неподвижной и подвижной частей. Фиксировать положение перемычки можно, например, при помощи вставки в отверстие крепления (см. рисунок 4.11, г). Можно выполнить раздвигающуюся часть вертикальной стойки в виде телескопически выдвигающейся детали.

Для вставки вертикальной стойки в пазы вращающейся штанги, на ней выполнены пазы (см. рисунок 4.11, ∂). Вертикальные и горизонтальные стойки при установке перемычки, раздвигаются по сечению выработки. В пазы стоек вставляется пневморукав. После сборки перемычки на нее одевается полотно, и она возводится в вертикальное положение (см. рисунок 4.11, e). Далее конструкция закрепляется, а в пневморукав накачивается воздух.

Достоинством предлагаемой перемычки является возможность ее быстрого возведения и надежная изоляция выработки от проникновения воздуха и дымовых газов.

Достигается указанный эффект за счет того, что все неровности горной выработки будут сглажены за счет пневморукава, на надув которого потребуется примерно 2—4 литра воздуха (из баллона со сжатым воздухом). Ввиду того что полотно перемычки не будет связано с пневморукавом, при его износе можно будет использовать другое полотно. Это увеличит эксплуатационный срок работы перемычки.

Теоретически приведенная шахтная вентиляционная перемычка позволит быстро и надежно изолировать участок горной выработки. Однако необходимо произвести моделирование подобных условий, изготовить и испытать предлагаемое устройство, чтобы гарантировать возможность его применения в реальных условиях.

4.2. Средства и способы регулирования воздухораспределения в аварийном режиме проветривания

В процессе добычи полезного ископаемого на шахте или руднике добычные участки удаляются от воздухоподающих стволов, увеличивается количество проходимых горных выработок. Для повышения рентабельности производства наращивается объем добываемого полезного ископаемого. Все это приводит к тому, что подземным предприятиям постоянно приходится наращивать объем свежего воздуха, подаваемого для проветривания рабочих зон. Стремясь снизить удельные затраты на проветривание, горнодобывающие предприятия начинают внедрять новые технологии и устройства, способствующие улучшению условий энергосбережения. Однако зачастую определяется только экономическая сторона от внедрения подобного рода устройств и технологий, но не анализируется изменение условий безопасности при их внедрении.

4.2.1. Оценка степени безопасности при возникновении нештатной ситуации на рудниках, использующих систему рециркуляции воздуха

В настоящее время предлагается использовать оптимальное управление проветриванием, за основу в котором берется принцип частичного повторного использования воздуха (рециркуляции), известный с 70–80-х годов XX века, и использование автоматического отрицательного регулирования – ограждения автоматическими вентиляционными дверями (АВД) выработок главных направлений с целью перераспределения воздуха между ними [81, 82, 143, 144, 154].

Ввиду того что горные предприятия является опасными производственными объектами, необходимо рассмотреть возможные сценарии протекания процесса воздухораспределения между горными выработками в случае возникновения различных нештатных ситуаций.

При возникновении пожара в горных выработках – одной из распространенных аварий на подземных горнодобывающих предприятиях – согласно Федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности (ФНиП) [91], необходимо произвести реверсирование струи. При этом перевод ГВУ в реверсивный режим должен быть осуществлен не более чем за 10 минут. Однако наличие в подземных горнодобывающих предприятиях большого объема выработанного пространства не позволяет удовлетворить это требование. В работах [9, 35] доказано, что после реверса ГВУ изменяется направление движения воздуха только в вентиляционном стволе и главных вентиляционных выработках, а в воздухоподающих стволах и выработках главных направлений воздух будет продолжать двигаться в том же направлении, так как выработанные пространства начнут играть роль источников тяги.

Также в п. 208 ФНиП [91] указывается, что при реверсии струи ГВУ в рудниках, использующих систему рециркуляции, должны быть предусмотрены специальные мероприятия, исключающие попадание загазованного воздуха в свежую струю, направляемую к путям вывода людей, а контроль содержания горючих и ядовитых газообразных примесей в воздухе предписывается проверять после слияния свежей струи с рециркулируемым воздухом. При этом не указываются конкретные мероприятия, а также не описывается ситуация выхода из строя системы автоматического контроля параметров рециркулируемого воздуха.

Если проверку реверсивных устройств можно производить без установки процесса проветривания, сначала на резервном (во время работы основного вентилятора), а затем после пуска резервного вентилятора — на основном вентиляторе (п. 181 ФНиП [91]), то АВД и рециркуляционный вентилятор проверять без изменения режима проветривания невозможно. Кроме того, следует учитывать, что реверсивные устройства на ГВУ находятся в состоянии покоя и включаются только при реверсировании струи, а АВД и рециркуляционный вентилятор непрерывно участвуют в процессе проветривания и постоянно изменяют режимы своей работы, т.е. их система правления изнашивается.

Исходя из этого необходимо рассмотреть возможные варианты развития нештатной ситуации. Ввиду того что подавляющее большинство рудников в России работают по всасывающему принципу проветривания, были рассмотрены ситуации для предприятия, работающего по данному способу.

Ситуация $N \ge 1$ Выход из строя $AB \square$ (остались в открытом положении) при реверсировании вентиляционной струи.

Ввиду того что перевод режима проветривания в реверсивный осуществляется не сразу (предписывается произвести в течение 10 минут), часть исходящего воздуха будет попадать на свежую струю даже при выключенном рециркуляционном вентиляторе (рисунок 4.12, *a*). В этой ситуации появляется вероятность отравления дымовыми газами горнорабочих, попавших в эту струю.

После перевода ГВУ в реверсивный режим воздух будет попадать в подземные горные выработки, т.е. в место возникновения пожара, как по вентиляционному стволу, так через рециркуляционный контур и воздухоподающие стволы (за счет влияния выработанных пространств). Направление движения потоков воздуха показано на рисунке 4.12, б. В это время дымовые газы будут не удаляться из рабочей зоны, а, наоборот, в ней скапливаться [297–303].

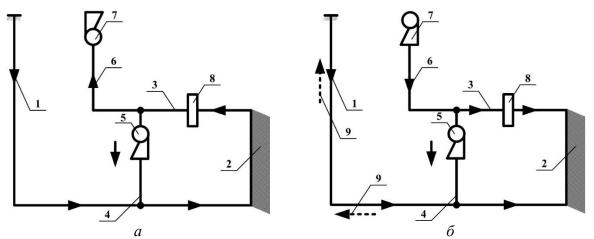


Рисунок 4.12 — Упрощенная схема проветривания рудника при применении системы рециркуляции («заклинивание» АВД в открытом положении): I — воздухоподающий ствол; 2 — выработанное пространство и добычные участки; 3 — главные вентиляционные выработки; 4 — рециркуляционный контур; 5 — рециркуляционный вентилятор; 6 — вентиляционный ствол; 7 — ГВУ; 8 — АВД; 9 — требуемое направление движения воздуха при реверсии

Ситуация № 2. Выход из строя ABД (остались в закрытом положении) при реверсировании вентиляционной струи.

Любая система, даже самая надежная, может выйти из строя. Поэтому необходимо рассматривать даже теоретические возможности аварийных и нештатных ситуаций.

При выходе из строя в закрытом положении («заклинивание») АВД путь движения воздуха от ГВУ в рабочую зону будет перекрыт. Единственный возможный путь для воздуха в этой ситуации — движение через рециркуляционный контур (рисунок 4.13, a).

Учитывая тот факт, что за счет возникновения эффекта всасывания воздуха в выработанное пространство [9, 35] направление движения от воздухоподающих стволов в рабочую зону не изменится, очаг возгорания будет пополняться свежим воздухом еще и от вентиляционного ствола (через рециркуляционный контур).

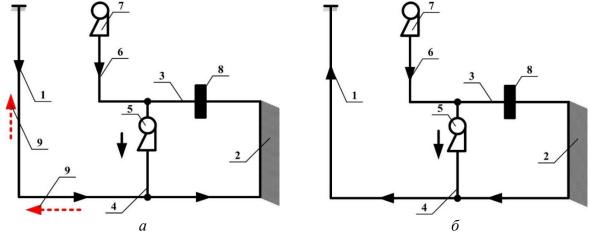


Рисунок 4.13 — Упрощенная схема проветривания рудника при применении системы рециркуляции («заклинивание» АВД в закрытом положении): I — воздухоподающий ствол; 2 — выработанное пространство и добычные участки; 3 — главные вентиляционные выработки; 4 — рециркуляционный контур; 5 — рециркуляционный вентилятор; 6 — вентиляционный ствол; 7 — ГВУ; 8 — АВД; 9 — направление движения дымовых газов

Реверс струи в этом случае возможен только после заполнения всего пространства рудника дымовыми газами, которые после этого будут выдаваться на поверхность через воздухоподающие стволы (рисунок 4.13, δ).

В этом случае рециркуляционный контур будет играть негативную роль — способствовать движению воздуха из рабочей зоны по воздухоподающим стволам на поверхность.

При реверсе ГВУ также через рециркуляционный контур воздух направится в воздухоподающий ствол, нарушив воздухораспределение в выработках (рисунок 4.13, б). После выхода воздуха из выработанного пространства направить в выработки свежий воздух будет невозможно, так как он в любом случае при включении ГВУ в нормальном (нереверсивном) режиме пойдет из воздухоподающих стволов в вентиляционный (через рециркуляционный контур или в обратном направлении).

Рассмотренные ситуации показывают, что в случае возникновения такой нештатной ситуации, как пожар в подземных горных выработках, предлагаемая в настоящее время система проветривания не только не будет способствовать созданию условий безопасности, но и в некоторых случаях сама будет являться причиной возникновения опасных условий для жизни и здоровья горнорабочих.

Ввиду того что за счет реверса струи защиту горнорабочих полностью обеспечить не удается, необходимо рассмотреть существующие способы защиты от попадания дымовых газов в рабочую зону непосредственно на самом добычном участке.

4.2.2. Управление системой проветривания при возникновении аварийных ситуаций

С точки зрения энергосбережения система рециркуляции воздуха, опробованная на рудниках и шахтах в России и других странах, способна значительно снизить затрачиваемую на проветривание электроэнергию (более 30 %). Однако при ее использовании возникают аварийные ситуации, опасные для жизни и здоровья горнорабочих.

К установленным причинам низкой эффективности предложенных мер по обеспечению безопасности при возникновении пожара относятся: влияние выработанного пространства, начинающего при реверсе закачивать в себя воздух со стороны воздухоподающих и вентиляционного стволов, и размещение АВД в выработках, через которые осуществляется снабжение воздухом всего рудника.

Обе эти задачи можно решить путем смены места расположения АВД: установить их в выработках главных направлений (рисунок 4.14) [221].

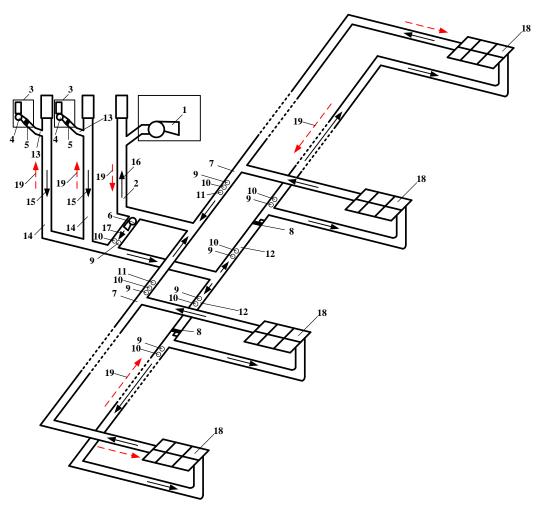


Рисунок 4.14 — Схема проветривания рудника при использовании системы рециркуляции по предлагаемому способу: I — ГВУ; 2 — вентиляционный ствол; 3 — здание шахтной калориферной установки (ШКУ); 4 — вентилятор ШКУ; 5 — теплообменник ШКУ; 6 — рециркуляционный вентилятор; 7 — главные вентиляционные выработки; 8 — автоматические вентиляционные двери; 9 — датчик расхода воздуха; 10 — датчики состава воздуха; 11 — датчики давления и температуры (или плотномер); 12 — выработки главных направлений; 13 — калориферный канал; 14 — воздухоподающий ствол; 15 — поступающий воздух; 16 — выдаваемый воздух; 17 — рециркуляционный воздух; 18 — добычные участки; 19 — требуемое направление движение воздуха при реверсе ГВУ

Предложенная система в штатном режиме будет работать аналогично существующим, частично использующим выдаваемый воздух, при проверке степени его загрязненности датчиками. Отличие, помимо изменения месторасположения АВД, заключается в том, что в системе будет учитываться изменение воздухораспределения между стволами за счет действия общерудничной естественной тяги и других случайных факторов по алгоритму, описанному в главе 2.

Работа системы проветривания осуществляется в автоматическом режиме.

При возникновении нештатной ситуации, когда ГВУ необходимо перевести в реверсивный режим, система управления подает сигнал на плавное (для исключения вероятности пневмоудара) закрытие АВД, а также в реверсивный режим включаются нагнетательные вентиляторы ШКУ. За счет работы рециркуляционного вентилятора и нагнетательных вентиляторов ШКУ, работающих в реверсивном режиме, возникает тяга, способствующая перемене направления движения воздуха в воздухоподающих стволах, а закрывающиеся АВД препятствуют движению воздуха в выработанное пространство.

За счет закрытия АВД за ними образуется зона с пониженным давлением воздуха. В это время система управления остановит рециркуляционный вентилятор, перекрыв путь для «закорачивания» вентиляционной струи из вентиляционного ствола в воздухоподающие.

Таким образом, в руднике появится зона с пониженным давлением (за АВД), которая нивелирует действие выработанного пространства как источника тяги, и будет способствовать смене направления движения воздуха в сторону воздухоподающих стволов.

Весь процесс контролируется датчиками расхода и давления воздуха. Поэтому при получении информации с датчиков о смене направления движения воздуха в добычном участке АВД начнут открываться, создавая путь для движения воздуха на поверхность. Условия для открытия и угол открытия АВД определяются системой управления процессом проветривания. За счет того что АВД находятся не в главных вентиляционных выработках, а в выработках главных направлений, они не перекрывают путь воздуху, подаваемому в рудник за счет работы ГВУ. Кроме того, АВД все время находятся в открытом положении и должны сработать только в случае возникновения аварийной ситуации.

Предложенный способ также требует анализа ситуаций при выходе из строя АВД.

Ситуация № 1. Выход из строя АВД (остались в открытом положении) при реверсировании вентиляционной струи (предложенный способ).

В этом случае АВД не смогут выполнить функцию преграждения пути движения воздуху из воздухоподающих стволов при реверсе ГВУ, т.е. не смогут нивелировать негативное действие выработанного пространства, начинающего в этот период играть роль источника тяги. Однако положительным моментом является тот факт, что в этой нештатной ситуации АВД не создадут дополнительной угрозы.

Ситуация № 2. Выход из строя АВД (остались в закрытом положении) при реверсировании вентиляционной струи (предложенный способ).

В этой ситуации система управления снизит производительность ГВУ (либо полностью прекратит подачу), и воздух будет поступать в рудник за счет созданного перепада давлений между источником тяги, выработанным пространством и зоной за АВД. Процесс работы ГВУ при этом также регулируется в автоматизированном режиме в зависимости от информации, поступающей с датчиков. Учитывая тот факт, что АВД находятся в резерве и срабатыситуации, вают только В случае возникновения нештатной ИХ работоспособность можно контролировать в постоянном режиме, что значительно снижает вероятность выхода их из строя.

Таким образом, предложенный способ позволит обеспечить снижение затрат энергетических ресурсов на проветривание за счет частичного повторного использования воздуха и управления производительностью ГВУ с учетом действия возникающей общерудничной естественной тяги и других случайных факторов. При этом система управления позволит в случае возникновения

нештатной ситуации перевести режим проветривания в реверсивный за более короткий промежуток времени и повысить уровень безопасности при выходе из строя АВД.

4.2.3. Схемы проветривания добычных участков и способы управления воздухораспределеним между горными выработками, обеспечивающие защиту горнорабочих при возникновении пожара

Возникновение пожара в горных выработках рудников и шахт является одной из самых опасных аварий на подземных горнодобывающих предприятиях. От места возникновения возгорания и интенсивности пожара зависит направление движения дымовых газов и воздухораспределение между горными выработками в целом. В связи с тем что мест, в которых может возникнуть пожар, неограниченно много, и при условии, что вентиляционная обстановка в добычных участках постоянно изменяется (по мере отработки шахтного поля), точно спрогнозировать возможные пути движения дымовых газов и их концентрацию во всей шахте (руднике) практически невозможно.

Однако можно спрогнозировать возможные пути движения дымовых газов в отдельных добычных участках или вне зависимости от их направления предусмотреть возможность изолирования рабочей зоны от проникновения в нее продуктов сгорания. Для этого на шахтах и рудниках во всем мире используются устройства для изолирования горной выработки — шахтные вентиляционные перемычки.

В качестве исследуемого объекта было принято решение выбрать калийный рудник, обладающий малым аэродинамическим сопротивлением выработок [13, 159]. Вследствие малого аэродинамического сопротивления при возникновении пожара перепад температур (тепловая депрессия) за короткий период времени изменит направление движения воздуха. При этом из-за большого сечения (по сравнению с другими рудниками и шахтами) выработок возникает проблема по применению изолирующих устройств. Связано это с тем, что конструкция шахтной вентиляционной перемычки будет громоздкой,

и на ее возведение потребуется значительное количество времени, что недопустимо во время пожара.

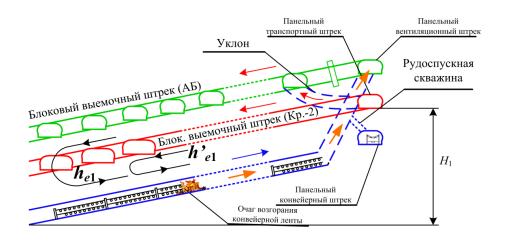
Наиболее возможным местом возникновения пожара является конвейерный штрек. В связи с этим, в п. 277 ФНиП [91] говорится о необходимости оснащения конвейеров трудносгораемыми лентами и средствами автоматического пожаротушения и сигнализации на приводных станциях. Ввиду того что резинотканевые ленты в настоящее время почти полностью исключены для использования, по правилам система пожаротушения должна располагаться только на приводных барабанах.

Как показали исследования [304, 305], возгорание конвейерной ленты (даже резинотканевой) на натяжных и приводных станциях участковых конвейерных линий произойти не может из-за недостаточной температуры при трении и перетирании ленты.

Вероятность возгорания конвейерной ленты значительно повышается при трении нижней ветви ленты о стойку конвейера, когда с ленты снимаются мелкие частички («мука»), которые скапливаются у стойки. Подобная ситуация может произойти при отказе датчика схода ленты. При длительной работе конвейера место контакта ленты и стойки может раскаляться докрасна, но лента будет касаться горячей стойки около 0,1 секунды, что не достаточно для воспламенения. Во время остановки конвейера и контакте мелких частиц и самой ленты с раскаленной стойкой может произойти возгорание [306].

В случае пожара в конвейерном штреке температура воздуха в нем начнет возрастать, что неизбежно приведет к увеличению естественной тяги, действующей между конвейерным и выемочным штреками. При отработке блоков по традиционной схеме дымовые газы за счет увеличивающейся тепловой депрессии начнут поступать в рабочие камеры. Подобная ситуация возникла на руднике БКПРУ-3 (г. Березники) в 1980 году, в результате чего погибло пять горнорабочих [13, 35].

В работе [13] предложен способ проветривания добычного участка (на примере калийного рудника), в котором конвейерный штрек предлагается использовать в качестве вентиляционного. В этом случае в блоках, расположенных по падению пласта, в предлагаемой схеме проветривания данное явление неопасно, так как весь задымленный воздух будет удаляться в панельный вентиляционный штрек (рисунок 4.15). Но для блоков, расположенных по восстанию пласта, тепловые депрессии $h_{\rm el}$ и $h'_{\rm el}$ могут достигнуть такой величины, что они превысят значение общешахтной депрессии и тепловых депрессий, действующих между выемочным и вентиляционными штреками (рисунок 4.16). Это может привести к тому, что задымленный воздух из конвейерного штрека начнет поступать в рабочие камеры.



Направление потока пожарных газов

Рисунок 4.15 — Распространение пожарных газов в блоке, расположенном по падению пласта (предлагаемая схема)

Для анализа данного явления были рассчитаны значения тепловых депрессий, возникающих во время пожара в конвейерном штреке, и определено их влияние на воздухораспределение в блоке, расположенном по восстанию пласта следующим образом.

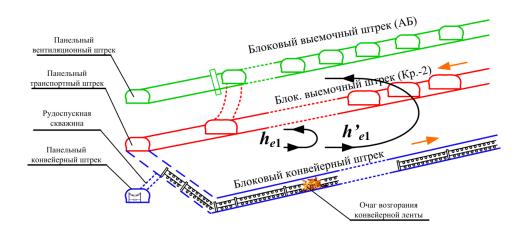
Минимальная температура, при которой возможно воспламенение конвейерной ленты согласно [307] должна достигать значения не ниже 300 °C.

Поэтому еще до возможного возгорания ленты средняя температура в конвейерном штреке начнет повышаться, что приведет к повышению естественной тяги h_{e1} и, как следствие, изменению воздухораспределения в блоке.

Температура воздуха на расстоянии L от места нагрева (возгорания) согласно [293, 306] определяется по формуле:

$$T_{L} = T_{_{\rm B}} + \frac{T_{_{\rm II}} + \left(T_{_{\rm O.\Gamma.}} - T_{_{\rm II}}\right) \cdot \exp\left[-\frac{\alpha_{_{\rm IIT}} \cdot P_{_{\rm Bbip}}}{G \cdot c_{_{p}}} \cdot \left(L - v_{_{\rm IOЖ}} \cdot T_{_{\rm rop}}\right)\right]}{P_{_{\rm Bbip}}}, \tag{4.3}$$

где T_{Π} и $T_{\text{о.г.}}$ – температуры соответственно горных пород и в очаге пожара, °C; $\alpha_{\Pi\Gamma}$ – коэффициент теплоотдачи от пожарных газов к стенке выработки, ккал/(м²·ч °C); $P_{\text{выр}}$ – периметр выработки, м; G – весовой расход воздуха, проходящего по выработке, кг/ч; c_p – удельная теплоемкость воздуха, ккал/(кг·°C); $v_{\Pi \text{ож}}$ – средняя скорость перемещения очага горения, м/с; $T_{\text{гор}}$ – время горения, с; $T_{\text{в-}}$ температура воздуха в конвейерном штреке, °C.



Направление потока пожарных газов

Рисунок 4.16 — Распространение пожарных газов в блоке, расположенном по восстанию пласта (предлагаемая схема)

Коэффициент α_{nr} согласно [296] при сохранении единиц измерения определяется по формуле

$$\alpha_{_{\rm IIT}} = 4,42 + 3,54 \cdot v_{_{\rm B}}, \tag{4.4}$$

где $v_{\rm B}$ – скорость движения воздуха в выработке, м/с.

Для расчета концентрации дымовых газов и моделирования их распределения по ветвям вентиляционной сети был применен алгоритм расчета, описанный в работе [308], в котором при возникновении пожара и объема вредностей, приносимых в выработки рассматриваемого блока, определяется объем воздуха в дополнительной условной ветви (ветвь 37 на рисунке 4.17), означающую сток газов 100%-ной концентрации.

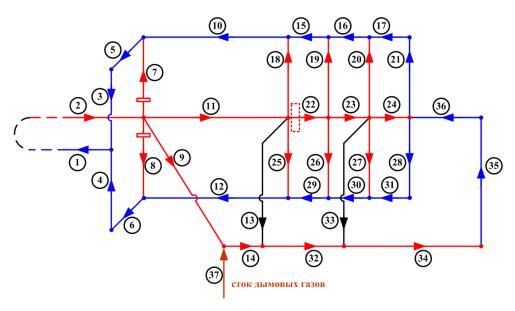


Рисунок 4.17 – Вентиляционная модель блока, отрабатываемого по восстанию пласта

Расчет, выполненный по алгоритму, приведенному в [13], показал, что реверс в выемочном штреке на участке до отработанных камер (ветвь 22 на рисунке 4.17) наблюдается уже через 60 секунд после начала возгорания.

При обработке полученных значений скорости воздуха в конвейерном штреке выяснилось, что поступление дымовых газов в выемочный штрек (по ветви 36) начнется через 352,8 секунды после возгорания конвейерной ленты.

Исходя из того что концентрация газов, выделяемых при возгорании конвейерной ленты в зависимости от температуры в очаге пожара $T_{\text{о.г.}}$, согласно выводу из формулы [309] может быть определена как

$$C = \frac{30 \cdot \exp\left(\frac{T_{\text{o.f.}}}{758,6}\right)^{1.6} - 30}{\exp\left(\frac{T_{\text{o.f.}}}{758,6}\right)^{1.6}}, \%, \tag{4.5}$$

объем поступающих по условной ветви дымовых газов будет равен

$$Q_{37} = \frac{Q_9 \cdot C}{100}, \, \text{M}^3/\text{c}.$$
 (4.6)

После расчета вентиляционной сети выяснилось, что расчетная концентрация дымовых газов в рабочих камерах уже на 240-й секунде составила 4,032 %, что значительно превышает ПДК.

При моделировании аварийной ситуации, но с применением шахтной вентиляционной перемычки сразу за отрабатываемыми камерами (ветвь 22 на рисунке 4.17), выяснилось, что практически все дымовые газы удаляются через отработанные камеры (ветви 19, 20, 21, 26, 27, 28 на рисунке 4.17) в вентиляционные штреки 10 и 12 (см. рисунок 4.17). В рабочей зоне концентрация дымовых газов в пределах нормы.

4.3. Обеспечение безопасности в случае реверса струи воздуха в холодное время года

Все воздухоподающие стволы оборудуются ШКУ. Однако на вентиляционных стволах система обогрева воздуха не предусмотрена. Поэтому если в случае необходимости выполнить реверсию ГВУ в холодное время года, есть вероятность, что в шахту (рудник) будет подаваться холодный воздух, что противоречит правилам безопасности [91].

Для исключения подобной ситуации на рудниках необходимо устанавливать ШКУ, которая будет нагревать холодный воздух в случае перевода ГВУ в реверсивный режим в холодное время года.

Предлагаемая схема расположения ШКУ приведена на рисунке 4.18. При реверсировании ГВУ диффузорная (ДЛ) и общая (ОЛ) ляды будут закрыты. Подача воздуха будет производиться через открытую атмосферную ляду (АЛ). Для нагрева воздуха в окнах надстройки над АЛ будут установлены теплообменники (калориферы).

Для примера калориферную установку можно оснастить электрическими теплообменниками, выпускаемыми компанией «Веза» [310].

Калориферная установка на вентиляционном стволе рассчитывалась так, чтобы ее мощности хватило на подогрев всего объема воздуха, проходящего через нее в наиболее холодное время года (согласно [94] температура воздуха наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92 равна –36 °C).

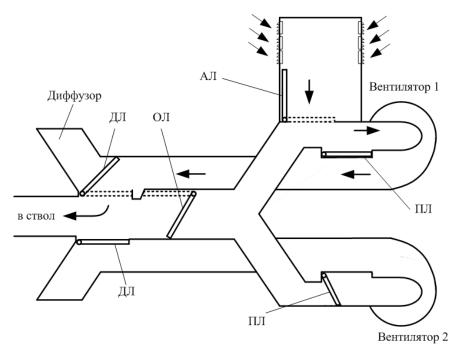


Рисунок 4.18 — Схема движения воздуха при реверсии: АЛ — атмосферная ляда; ДЛ — диффузорная ляда; ОЛ — канальная (общая) ляда; ПЛ — ляда в подводящем канале вентилятора

В результате расчетов [311] выяснилось, что для обеспечения нагрева воздуха при реверсии струи ШКУ необходимо оснастить 22 электрическими воздухонагревательными блоками КЦКП-100 [311], температура воздуха на выходе из которых составит + 10,55 $^{\circ}$ С. При этом общая потребляемая электрическая энергия, затрачиваемая на работу КУ, составит $N_{\rm KY}$ = 35 362,8 кВт·ч.

Характеристики воздухонагревательного блока КЦКП-100 приведены в таблице 4.1.

Ввиду того что ТЭНы (трубчатые электронагревательные элементы) воздухонагревательных блоков КЦКП-100 могут включаться ступенями мощностью 33; 66,5; 100 % от установленной [311], тепловую мощность, а следовательно, и потребление электроэнергии можно будет регулировать в зависимости от температуры наружного воздуха.

Таблица 4.1 – Характеристики электрического воздухонагревательного блока для КЦКП-100

Цонражовия	Мощность од-	Кол-во	Номинальный расход		Суммарная мощность
Напряжение питания, В	ного ТЭНа,	ТЭНов,	воздуха, \mathcal{Q}_{TO}		воздухонагревателя
	$q_{T\!\! \ni \!\! H}$, к ${ m B}$ т	шт.	M^3/c	M^3/H	P бл., к $\mathrm{B}\mathrm{T}$
220	2,85	564	27,778	100 000	1607,4

Несмотря на значительные затраты электроэнергии при работе и расходы на приобретение и оснащение вентиляционного ствола ШКУ, можно с уверенностью говорить о том, что в случае возникновения аварии в холодное время года температура воздуха, подаваемого в рудник, будет соответствовать правилам безопасности.

4.4. Выводы по разделу

В настоящей главе получены следующие результаты:

- 1. Разработаны способы проветривания добычных участков калийных рудников при прямом и обратном способах отработки полезного ископаемого, позволяющие снабжать рабочую зону свежим воздухом в энергосберегающем режиме и обеспечивающих при возникновении пожара удаление дымовых газов из области ведения горных работ.
- 2. Предложена конструкция шахтной вентиляционной перемычки, предназначенной для регулирования эффективного воздухораспределения в добычном участке и для ограждения рабочей зоны от проникновения в нее дымовых газов в случае возникновения пожара.
- 3. По результатам оценки степени безопасности существующих способов проветривания калийных рудников при возникновении нештатных ситуаций, разработана система проветривания, исключающая выявленные недостатки.
- 4. Предложено использовать ШКУ на вентиляционном стволе для обеспечения безопасности проветривания в случае необходимости осуществления реверса ГВУ в холодное время года.

ГЛАВА 5. УСТРОЙСТВА ОПЕРАТИВНОГО ЭФФЕКТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА МЕЖДУ ГОРНЫМИ ВЫРАБОТКАМИ В НОРМАЛЬНОМ И АВАРИЙНОМ РЕЖИМАХ

Обеспечение безопасности ведения горных работ и рационального при этом использования энергоресурсов, расходуемых на проветривание, возможно путем изолирования горных выработок от проникновения в них дымовых газов при возникновении пожара и «излишков» воздуха в участки непредназначенные для проветривания. Для этой цели в главе 4 предложена конструкция шахтной вентиляционной перемычки (ШВП). При этом в главе 4 описана конструкция ШВП без привязки к конкретным горным выработкам и без учета их особенностей: конфигурация, сечение, прочность пород и т.д. Поэтому для оценки эффективности работы ШВП нового типа требуется изготовление ее опытного образца для конкретного горнодобывающего предприятия. Объектом исследования в главе 4 являются калийные рудники Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС). В связи с этим изготовление и испытания ШВП нового типа предполагается именно для этого типа подземных горных предприятий.

Разработка нового устройства требует комплекса мероприятий, включающих в себя математическое моделирование изменения параметров всех элементов конструкции при изменяющихся внешних условиях, изготовление опытного образца на основании полученных результатов и его испытание в реальных условиях.

Предложенная ШВП нового типа состоит из трех основных узлов, каждый из которых должен обладать определенными свойствами:

- 1. Силовой каркас: прочность, способность выдерживать давление потока воздуха (дымовых газов) заданной скорости.
- 2. Пневморукав: способность обеспечивать требуемые прежимные усилия по всему геометрическому сечению горной выработки.
- 3. Полотно: выдерживать температуру и давление потока воздуха (дымовых газов) заданной скорости.

При разработке моделей ШВП использованы несколько подходов. В первом случае описание свойств и явлений производилось на основе известных упрощенных непрерывно-детерминированных аналитических соотношений, позволяющих описать тот или иной процесс или явление при помощи конечной формулы или дифференциального уравнения. Такие аналитические модели и формулы использовались, например, для вычисления нагрузок на ШВП при изменяющейся скорости потока воздуха; оценки объема баллона со сжатым воздухом, необходимого для заполнения пневморукава, с созданием в нем заранее определенного внутреннего давления; упрощенного определения картины деформирования пневморукава на основе соотношений теории сопротивления материалов и других теоретических закономерностей.

Второй подход — использование более сложных числовых моделей, как правило, на основе метода конечных элементов (МКЭ), позволяющих в том числе проводить учет нелинейного характера деформирования конструкции, оценивать потерю устойчивости ШВП и пр.

5.1. Разработка математической и компьютерной моделей шахтной вентиляционной перемычки на основе метода конечных элементов

Анализ напряженно-деформированного состояния ШВП, ее подсистем или отдельных элементов методами математического анализа с использованием при создании моделей аппарата дифференциальных уравнений с ручным поиском их аналитических решений затруднен в силу пространственности конструкции и ее непрямолинейности (необходимость работы в криволинейных координатах). В связи с этим при разработке математических моделей элементов ШВП формулировались задачи в общем трехмерном виде, после чего осуществлялся поиск решения с использованием метода конечных элементов. При этом не создавались полностью трехмерные модели и конечноэлементные аналоги, а рассматривалась конструкция ШВП как набор балочных и оболочечных элементов с последующим выбором соответствующих типов конечных элементов.

5.1.1. Краткие основы применяемого метода конечных элементов

Решение поставленной задачи базируется на методе конечных элементов (МКЭ) [312], который осуществляет решение вариационного уравнения, соответствующего математической задаче.

$$\delta A_{\sigma} + \delta A_{u} + \delta A_{p} + \delta A_{f} = 0, \tag{5.1}$$

где $\delta A_{\sigma} = \int\limits_{V} \hat{\sigma} \cdot \cdot \delta \hat{\epsilon} dV$ — вариация работы внутренних упругих сил;

$$\delta A_u = -\int\limits_V \delta \overline{u} \cdot \left(\rho \ddot{\overline{u}} \right) dV$$
 — вариация работы сил инерции; $\delta A_p = \int\limits_S \delta \overline{u} \cdot \overline{P} dS$ — вариа-

ция работы внешних поверхностных сил; $\delta A_f = \int\limits_V \delta \overline{u} \cdot \rho \overline{F} dV$ — вариация работы

внешних массовых (объемных) сил; dS — площадь элементарной площадки пневморукава; dV — объем элементарного участка пневморукава; σ — тензор напряжений; u — вектор перемещений; P — вектор внешних сил; ρ — плотность материала пневморукава; ε — тензор деформаций.

Основная идея МКЭ состоит в том, что исходную область V представляют в виде совокупности подобластей V^e , которые имеют, как правило, простую конфигурацию. Внутри каждой такой подобласти осуществляют локальную аппроксимацию искомых функций (в нашем случае — компонент вектора перемещений и углов поворотов) от координат точек этой области. Эта аппроксимация содержит информацию о величинах, которые называются узловыми неизвестными. Этими неизвестными могут быть значения искомых функций и их производных в конкретных точках (узлах) подобластей. Геометрическая конфигурация и принятая аппроксимация искомых функций определяет понятие конечного элемента.

В общем виде аппроксимация искомой функции в пределах области V^e данного конечного элемента в матричной форме имеет вид:

$$\{\overline{u}^e\} = [N^e] \{\overline{U}^e\}, \overline{x} \in V^e,$$
 (5.2)

здесь $\left[N^e\right]$ — матрица функций формы; $\left\{\bar{U}^e\right\}$ — вектор узловых неизвестных (перемещений).

Таким образом, введенное выше понятие конечного элемента позволяет достаточно просто вычислить интегралы в вариационном уравнении, заменив интеграл по всему объему суммой интегралов по каждому конечному элементу.

$$\sum_{e=1}^{NE} (\delta A_{\sigma})^{e} + \sum_{e=1}^{NE} (\delta A_{u})^{e} + \sum_{e=1}^{NE} (\delta A_{p})^{e} + \sum_{e=1}^{NE} (\delta A_{f})^{e} = 0.$$
 (5.3)

Здесь символ $X = \sum_{e=1}^{NE} (x)^e$ обозначает суммирование вкладов от каждого элемента $(x)^e$ по всем конечным элементам; NE — общее число конечных элементов.

Слагаемые вариационного уравнения поэлементно интегрируются для каждого конечного элемента (e):

$$\delta A_{\sigma} = \int_{V} \hat{\sigma} \cdot \delta \hat{\epsilon} dV = \left\{ \delta \bar{U}^{e} \right\}^{T} \left[k^{e} \right] \left\{ \bar{U}^{e} \right\}$$
 (5.4)

$$\delta A_{u} = -\int_{V} \delta \overline{u} \cdot (\rho \overline{u}) dV = - = \left\{ \delta \overline{U}^{e} \right\}^{T} \left[m^{e} \right] \left\{ \overline{U}^{e} \right\}$$
 (5.5)

$$\delta A_p = \int_{S} \delta \overline{u} \cdot \overline{P} dS = \left\{ \delta \overline{U}^e \right\}^T \left\{ \overline{f}^e \right\}_p \tag{5.6}$$

$$\delta A_f = \int_V \delta \overline{u} \cdot \rho \overline{F} dV = \left\{ \delta \overline{U}^e \right\}^T \left\{ \overline{f}^e \right\}_f. \tag{5.7}$$

Здесь $\left[k^e\right]$ — локальная матрица жесткости; $\left[m^e\right]$ — локальная матрица масс; $\left\{\overline{f}^e\right\}_p$ — локальный вектор нагрузок в элементе от поверхностных сил; $\left\{\overline{f}^e\right\}_f$ — локальный вектор нагрузок в элементе от объемных сил.

После интегрирования получаются локальные матрицы жесткости и масс. Глобальные матрицы для конечно-элементной системы вычисляются суммированием локальных матриц по всем элементам модели (1-NE), где NE — общее число конечных элементов:

$$[K] = \sum_{e=1}^{NE} [k^e]$$
 (5.8)

$$[M] = \sum_{e=1}^{NE} [m^e] \tag{5.9}$$

$${F} = \sum_{e=1}^{NE} {f^e}$$
 (5.10)

где [K] — глобальная матрица жесткости; [M] — глобальная матрица масс; $\{F\}$ — глобальный вектор нагрузок (правых частей) системы.

Разрешающая система дифференциальных уравнений для всех степеней свободы имеет вид:

$$[M]\ddot{\overline{u}} + [C]\dot{\overline{u}} + [K]\overline{u} = {\overline{F}}, \tag{5.11}$$

где $\{\overline{F}\}$ — функция нагрузки, зависящая от времени; $\{\overline{u}\}$ — вектор узловых перемещений; $\{\dot{\overline{u}}\}$ — вектор узловых скоростей; $\{\dot{\overline{u}}\}$ — вектор узловых ускорений; [C] — глобальная матрица демпфирования.

5.1.2. Разработанные конечно-элементные модели элементов шахтной вентиляционной перемычки

Первоначально под конфигурацию выработки была разработана параметрическая конечно-элементная модель силового каркаса ШВП. Модель позволяет учитывать свойства материала, все линейные размеры и форму поперечного сечения каждого стержневого элемента каркаса. Компьютерная модель позволяет добавлять в каркас дополнительные элементы или в короткие сроки изменять конфигурацию всей стержневой системы.

Одна из конфигураций силового каркаса, рассматриваемая на этапе эскизного проектирования, представлена на рисунке 5.1. При этом конфигурация горной выработки в этом случае не являлась окончательной и приоритетной, а модель создавалась для отработки предложенных математических и компьютерных моделей, подходов к многовариантному параметрическому проектированию.

На рисунке 5.2 представлена конечно-элементная модель силового каркаса ШВП. Конструкция рассматривается как набор соединенных между собой балочных конечных элементов, имеющих способность как изгибаться в двух направлениях, так и удлиняться и скручиваться. В качестве узловых неизвестных оставлены 3 перемещения и 3 угла поворотов. На рисунках модель каркаса представлена без растянутого полотна.

Созданная модель будет использоваться для анализа устойчивости всей конструкции в целом.

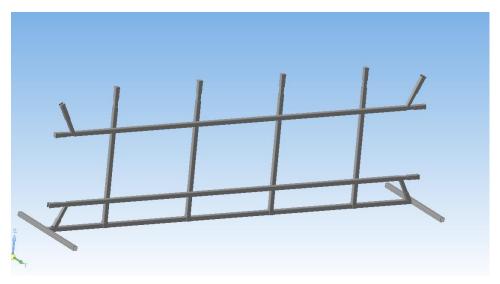


Рисунок 5.1 – Предварительный эскиз конфигурации силового каркаса

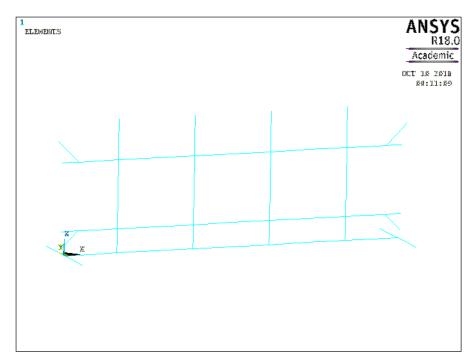


Рисунок 5.2 – Конечно-элементная балочная модель силового каркаса

Далее разрабатывалась трехмерная пространственная параметрическая конечно-элементная модель гибкого криволинейного пневморукава, параметрами которой являются внутренний радиус рукава, кривизна уложенного на опоры рукава, толщина оболочки, свойства материала. Элемент конечно-элементной модели, используемый для верификации компьютерной модели путем сравнения с аналитическим решением, представлен на рисунке 5.3.

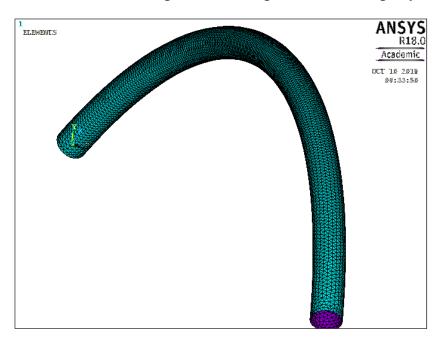


Рисунок 5.3 – Элемент конечно-элементной модели с нанесенной расчетной сеткой

Трехмерная модель гибкого пневморукава (см. рисунок 5.3) позволяет оценивать изменение кривизны рукава при заданном внутреннем давлении и известных жесткостных свойствах оболочки, а также определять контактные давления, возникающие при взаимодействии рукава со стенкой горной выработки.

5.2. Моделирование свойств пневморукава шахтной вентиляционной перемычки при различных внешних факторах

5.2.1. Анализ естественного прилегания пневморукава к стенке горной выработки без учета восстанавливающей силы от внутреннего давления

Ввиду того что горные выработки имеют сложную конфигурацию, конструкцию ШВП необходимо выполнить таким образом, чтобы пневморукав

полностью повторял контур ее сечения и обеспечивал при этом надежную изоляцию. Второй сложный момент связан с тем, что в конструкции необходимо предусмотреть как можно меньше элементов. Связано это с тем, что ШВП должна обладать свойствами быстрой сборки/разборки, а также малыми габаритами и весом для быстрого ее перемещения до места установки.

Для определения картины деформирования пневморукава между распирающими элементами каркаса в первом грубом приближении можно использовать известное уравнение изгиба балки из теории сопротивления материалов. Расчетная схема для поставленной оценочной задачи приведена на рисунке 5.4.

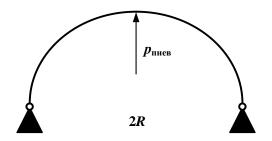


Рисунок 5.4 – Расчетная схема для оценки прогиба пневморукава между опорами

Исходя из условия симметрии рассматриваемой расчетной схемы реакции в шарнирных опорах можно сразу определить как

$$R_A = R_B = \frac{P}{2}. (5.12)$$

Так как задача симметрична, получим решения только для левой половины. Уравнение моментов относительно левого края можно записать в виде

$$M = -R_A x, (5.13)$$

где x – координата произвольного сечения балки на интервале [0, R].

Интегрирование уравнения моментов позволит получить соотношение для углов поворота произвольного сечения. Следующее повторное интегрирование даст уравнение изгиба балки:

$$\theta = \frac{1}{EJ} \left(-\frac{P \, x^2}{2} \right) + \theta_0,\tag{5.14}$$

$$y = \frac{1}{EJ} \left(-\frac{P}{2} \frac{x^3}{6} \right) + \theta_0 x + y_0, \tag{5.15}$$

где EJ — жесткость балки; E — модуль упругости материала (модуль Юнга); J — момент инерции поперечного сечения, y_0 и θ_0 начальные прогиб и угол поворота при x=0 соответственно.

Пусть расстояние между опорами 2R. Допустим, что пневморукав должен прилегать к круглым стенкам горной выработки радиусом R. Допустим, что приложенная в центр балки сила P – это реакции от опоры, которая отклоняет центр балки вверх на высоту R. Тогда величину силы P можно определить из условия прогиба в центре балки, равного

$$y(R) = R, (5.16)$$

при этом из условия закрепления прогиб при x = 0 должен быть равен нулю, а в силу симметрии задачи угол поворота в центре должен быть равен нулю, то есть:

$$y(0) = 0, (5.17)$$

$$\frac{1}{EJ} \left(-\frac{P}{2} \frac{R^2}{2} \right) + \theta_0 = 0, \tag{5.18}$$

$$\left(-\frac{PR^3}{26}\right) + \theta_0 R + y_0 = R. \tag{5.19}$$

Тогда

$$y_0 = 0,$$
 (5.20)

$$\theta_0 = \frac{PR^2}{4EI'} \tag{5.21}$$

$$P = \frac{6EJ}{R^2}. ag{5.22}$$

Итоговое уравнение изгиба балки примет вид:

$$y(x) = \frac{x^3}{2R^2} + \frac{3}{2}x. ag{5.23}$$

Соответствующий полученному уравнению профиль балки, опертой на три шарнирных опоры, лежащих на окружности радиусом R, показан на рисунке 5.5 (красная сплошная линия). Кроме того, там же отображен профиль круглого сечения выработки радиусом R (синий пунктир).

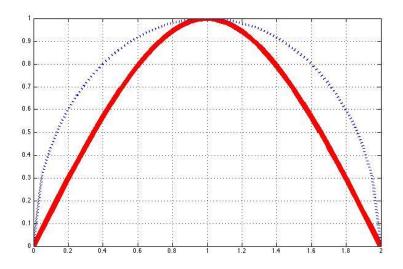


Рисунок 5.5 – Профиль пневморукава на трех опорах (пневморукав – красная сплошная, профиль выработки – синий пунктир)

В результате расчетов установлено, что характер изгиба пневморукава не зависит от материала, из которого он изготовлен (модуля упругости E), а также от размера его сечения (момента инерции J). Исходя из этого, очевидно, что обеспечить прижатие пневморукава по сечению горной выработки можно только путем увеличения прижимных точек. В этом случае появляется проблема увеличения веса конструкции, если в ней будет присутствовать большое количество элементов для прижатия пневморукава.

Кроме того, в качестве силовых факторов, определяющих профиль изгиба пневморукава, рассматриваются только классические «сопроматовские» изгибающие моменты и перерезывающие силы. Однако следует учитывать, что гибкий шланг под внутренним давлением начинает, во-первых, обладать дополнительной жесткостью, а во-вторых, с ростом внутреннего давления всячески сопротивляется изгибным деформациям, пытаясь вернуться в недеформированное прямолинейное состояние. Это говорит о том, что в системе появляется некоторый дополнительный силовой фактор, характер которого пока не определен (давление, распределенный момент и т.д.), но учет которого обязателен, что и будет сделано в последующих разделах.

5.2.2. Внутренние силовые факторы в криволинейных гибких пневморукавах. Восстанавливающая сила

Любой гибкий материал, в том числе пнеморукав, под давлением стремится перейти в прямолинейное состояние, в результате чего возникает проблема его прижатия к криволинейной поверхности горной выработки при его накачке воздухом. При наличии изгиба этот процесс становится еще более сложным, так как возникает так называемая восстанавливающая сила. Появление ее объясняется увеличением в размерах стенки пневморукава прижимаемой к горной выработке и уменьшением (за счет сжатия) противоположной стенки (рисунок 5.6).

Ввиду того что на обе эти части пневморукава действует одинаковое давление, возникает сила, действующая в направлении внутренней части пневморукава. Именно эту величину необходимо определить для описания характера прижатия пневморукава.

Для вывода зависимости, описывающей изменение восстанавливающей силы, выделяется элементарный отрезок пневморукава, на который действуют все силы при изгибе (см. рисунок 5.6).

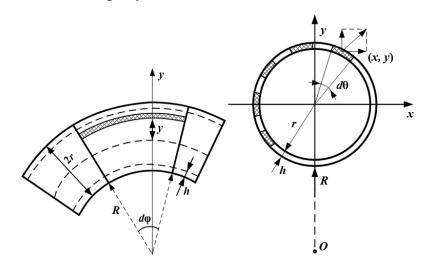


Рисунок 5.6 – Представительный элемент криволинейного канала

Пусть координаты элементарного объема определяются как:

$$x = r\cos\theta, y = r\sin\theta. \tag{5.24}$$

Тогда координаты вектора-нормали запишутся как \vec{n} {cos θ , sin θ }.

Длина элементарного объема определяется как

$$dl = (R + r + y)d\varphi = [R + r(1 + \sin \theta)]d\varphi.$$
 (5.25)

Вектор силы, действующей на внутреннюю поверхность выделенного элементарного объема:

$$\overrightarrow{dF} = p_0 dS \, \overrightarrow{n} = p_0 \, r \, d\theta \, dl \, \overrightarrow{n} = p_0 r [R + r(1 + \sin \theta)] \, d\phi \, d\theta \, \overrightarrow{n}. \quad (5.26)$$

Проекция элементарной силы на вертикальную ось запишется тогда в виде:

$$F_{\nu} = |\overrightarrow{dF}| \sin \theta = p_0 r [R + r(1 + \sin \theta)] \sin \theta \, d\phi \, d\theta. \tag{5.27}$$

Тогда для определения результирующей силы, действующей на всю внутреннюю усеченную цилиндрическую поверхность, образованную отдельными элементарными объемами в некотором сечении θ , необходимо проинтегрировать вертикальную проекцию силы F_y по длине окружности радиусом r:

$$F_{1} = 2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} p_{0} r [R + r(1 + \sin \theta)] \sin \theta \, d\phi \, d\theta =$$

$$= 2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} p_{0} r [R + r] \sin \theta \, d\phi \, d\theta + 2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} p_{0} r^{2} \sin \theta^{2} \, d\phi \, d\theta =$$

$$= -2 p_{0} r [R + r] \cos \theta \, d\phi \Big|_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} + 2 p_{0} r^{2} (\frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4}) \, d\phi \Big|_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} =$$

$$= 2 p_{0} r^{2} (\frac{\pi}{2}) \, d\phi = p_{0} \pi r^{2} d\phi.$$
(5.28)

Таким образом, получили, что в криволинейном канале радиуса r, у которого кривизна внутренних слоев равна R, а внешних — R+2r, возникает погонная нагрузка величиной

$$dF = p_0 \pi r^2 d\varphi. \tag{5.29}$$

Следует отметить, что, исходя из вывода определяющих соотношений, полученная погонная сила действует всегда перпендикулярно центральной линии рукава, по своей сути полученная погонная нагрузка является распреде-

ленным давлением. Для определения интегральной нагрузки требуется выполнить интегрирование погонной силы по длине дуги $(d\phi)$ на каждом криволинейном участке с заданной кривизной.

Из полученных в разделе результатов можно сделать следующий вывод. В изогнутых рукавах возникает распределенная по длине погонная восстанавливающая сила, направленная в сторону спинки изгиба рукава, которая зависит только от внутреннего давления и площади поперечного сечения рукава и не зависит от кривизны рукава. Полученные соотношения не были ранее замечены авторами в известных литературных источниках.

Определяемую по формуле восстанавливающую силу можно прикладывать на балочную модель ШВП в виде распределенной нагрузки для учета восстанавливающей силы на криволинейных участках.

5.2.3. Верификация модели пневморукава.

Сравнение результатов моделирования с аналитическим решением

Проведем верификацию созданной компьютерной модели пневморукава под внутренним давлением, закрепленного только в крайних точках. Рассмотрим рукав, представленный на рис. 5.3, расположенный на части окружности (длина рукава задается углом Θ . Например, для дуги в четверть окружности $\Theta = \frac{\pi}{2}$).

Как было показано ранее, в криволинейных деформированных рукавах в следствие разности площадей внутренней поверхности появляется несбалансированная погонная восстанавливающая сила, действующая в сторону изгиба, определяемая по формуле (5.29).

Интегрирование по длине дуги и проектирование нагрузки на вертикальную ось позволяет определить общую вертикальную составляющую силы как:

$$F = p_0 \pi r^2 \sin(\varphi). \tag{5.30}$$

Для определения реакции, возникающих в местах закрепления пневморукава, проводилась серия вычислительных экспериментов. Степень совпадения вычисленных реакций в заделках с аналитически посчитанной вертикальной составляющей силы необходима для охарактеризования адекватности и точности созданной конечно-элементной модели пневморукава. Результаты сравнений численных и аналитических расчетов представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Верификация конечно-элементной модели пневморукава

№ п/п	Расчет вертикального усилия по аналитической формуле (5.30), Н	Численный расчет вертикальной реакции в заделке по КЭ-модели (см. рисунок 5.3),	Относительная погрешность численной компьютерной модели, %	Параметры расчета *, (в СИ)
1	392,50	388,23	1,09	$p_0 = 0.5; R = 2; \Theta = \frac{\pi}{2}; r = 0.05$ $p_0 = 1.5; R = 2; \Theta = \frac{\pi}{2}; r = 0.05$ $p_0 = 1.5; R = 4; \Theta = \frac{\pi}{2}; r = 0.05$ $p_0 = 1.5; R = 2; \Theta = \frac{\pi}{2}; r = 0.5$
2	1193,20	1180,20	1,09	$p_0 = 1,5; R = 2; \Theta = \frac{\pi}{2}; r = 0,05$
3	1193,20	1180,20	1,09	$p_0 = 1,5; R = 4; \Theta = \frac{\pi}{2}; r = 0,05$
4	29830,00	29828,00	0,007	$p_0 = 1.5; R = 2; \Theta = \frac{\pi}{2}; r = 0.5$
5	74,57	67,18	9.91	p_0 = 1,5; R =2; $\Theta = \frac{\pi}{2}$; r =0,025; размер конечного элемента $-0,015$
6	74,57	74,45	0,16	p_0 = 1,5; R =2; $\Theta = \frac{\pi}{2}$; r =0,025; размер конечного элемента $-0,001$
7	0,62	0,61	1,61	$p_0 = 0.5; R = 2; \Theta = \pi; r = 0.05$
8	277,43	274,41	1,09	$p_0 = 0.5; R = 2; \Theta = \pi; r = 0.05$ $p_0 = 0.5; R = 2; \Theta = \frac{\pi}{4}; r = 0.05$

 Π р и м е ч а н и е : * p_0 — внутреннее давление (в долях от атмосферного 10^5 , в расчете внешнее атмосферное давление отсутствует), R — радиус изгиба средней линии пневморукава, θ — параметр, который определяет длину дуги рукава, r — радиус пневморукава.

Полученные результаты свидетельствуют, что созданная трехмерная конечно-элементная модель с высокой степенью точности описывает эффекты и силовые факторы, возникающие в криволинейных рукавах, нагруженных внутренним давлением. Так как полученные численные решения имеют погрешность менее чем в 1 %, проводить оценку сходимости численных алгоритмов в данном случае нецелесообразно. Однако следует принимать во внимание, что повышение степени дискретизации (мельчение сетки) необходимо

в тех случаях, когда рукав имеет малый радиус поперечного сечения. Это явно показано в расчетных случаях № 5 и № 6 (см. таблицу 5.1). В таких случаях необходимо соответствующим образом уменьшать размер конечного элемента, чтобы трехмерная модель позволяла корректно дискретизировать криволинейный цилиндр малого внутреннего диаметра.

5.2.4. Анализ влияния изгибной жесткости и давления на деформирование пневморукава с учетом восстанавливающей силы

Моделирования поведения пневморукава при различных внутренних давлениях и с разными жесткостными характеристиками произведены с использованием конечно-элементной модели. При этом на жесткость рукава (как способность сопротивляться приложенным внешним усилиям – в терминах механики, теории сопротивления материалов и пр.) оказывают влияние физикомеханические свойства самого материала, из которого изготовлен пневморукав, его радиус, толщина стенки, возможное армирование стенки, величина внутреннего давления и пр.

Результаты расчета полей перемещений рукавов с разными размерами сечений проведены под действием внутреннего давления различной величины. Для этого были взяты следующие значения для внутренних давлений $p_0 = 0.5 \cdot 10^5$ Па; $p_0 = 1.0 \cdot 10^5$ Па и $p_0 = 2.0 \cdot 10^5$ Па при фиксированном диаметре рукава d = 0.1 м. Для определенности было принято условие, что рукав имеет физико-механические свойства резины, толщина стенки рукава – 1 см.

Картины деформирования рукава с отображением первоначального недеформированного состояния (черная сетка) приведены на рисунках 5.7–5.9

Результаты моделирования на рисунках 5.7–5.9 представлены в истинном масштабе.

Явно видно, что с увеличением внутреннего давления растет величина отклонения рукава от первоначальной геометрии, что обусловливается действием распределенной силы, действующей в сторону изгиба криволинейного участка рукава. При достаточно больших, но тем не менее технически вполне реализуемых величинах внутреннего давления наблюдается значительное деформирование рукава. Так для давления $p_0 = 2,0 \cdot 10^5$ Па (см. рисунок 5.9) максимальное смещение составило около 41 см. Для давления $p_0 = 1,0 \cdot 10^5$ Па (см. рисунок 5.8) максимальное смещение составило около 20 см. Для давления $p_0 = 0,5 \cdot 10^5$ Па (см. рисунок 5.7) максимальное смещение составило около 10 см.

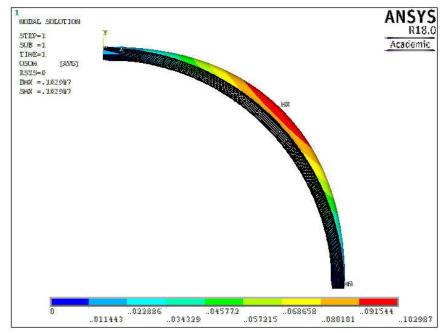


Рисунок 5.7 — Картина деформирования рукава при давлении $p_0 = 0.5 \cdot 10^5 \, \mathrm{\Pia}$

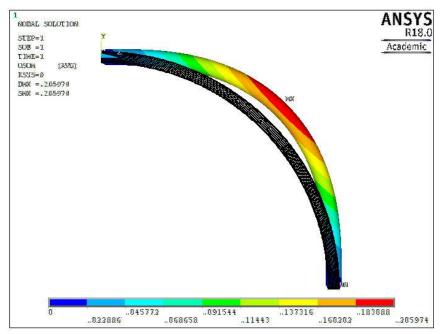


Рисунок 5.8 – Картина деформирования рукава при давлении $p_0 = 1,0 \cdot 10^5$ Па

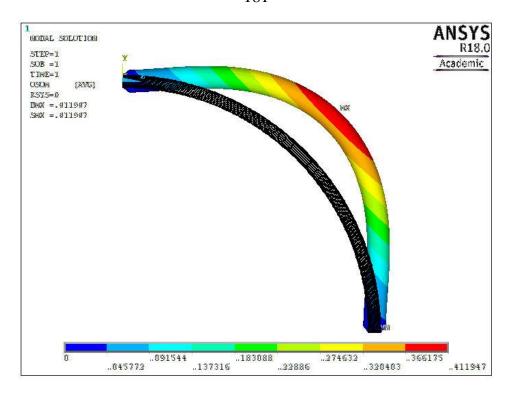


Рисунок 5.9 — Картина деформирования рукава при давлении $p_0 = 2.0 \cdot 10^5$ Па

В расчете пневморукав свободно деформировался, будучи закрепленным только лишь на концах криволинейного участка. В реальной ШВП перемещения рукава будут ограничены стенками горной выработки. Однако именно представленный здесь эффект обеспечит самоприжатие гибкого пневморукава к стенкам горной выработки.

Результаты моделирования для рукавов с диаметрами d = 0.05 м; d = 0.2 м при фиксированном внутреннем давлении $p_0 = 1.0 \cdot 10^5$ Па приведены на рисунках 5.10, 5.11). При диаметре d = 0.05 м максимальное отклонение составило порядка 10 см, а при диаметре d = 0.2 м – порядка 40 см.

Для определения влияния на кривизну рукава свойства материала, из которого он изготовлен, возможного деформирования и толщины стенки на созданной конечно-элементной модели участка рукава проведено моделирование свойств при изменении изгибной жесткости (рисунках 5.12 и 5.13).

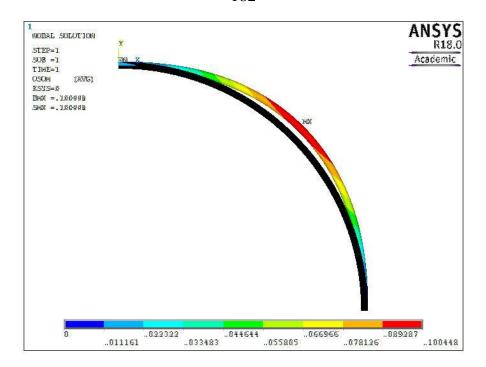


Рисунок 5.10 — Картина деформирования рукава при диаметре рукава d=0.05 м и давлении $p_0=1.0\cdot 10^5$ Па

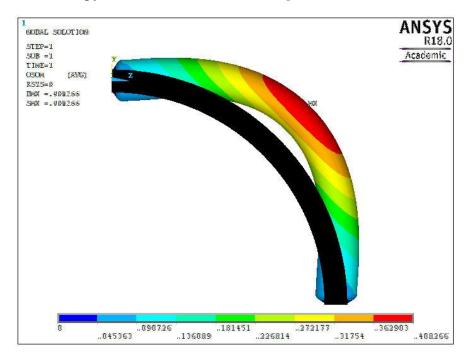


Рисунок 5.11 — Картина деформирования рукава при диаметре $\text{рукава } d = 0,\! 2 \text{ м и давлении } p_0 = 1,\! 0 \cdot 10^5 \text{ } \Pi \text{a}$

На рисунке 5.12 показана картина деформирования рукава для параметров, аналогичных расчету на рисунке 5.9, но модуль Юнга материала увеличен в 10 раз. Наблюдается резкое снижение максимальных перемещений рукава вследствие возрастания его жесткости.

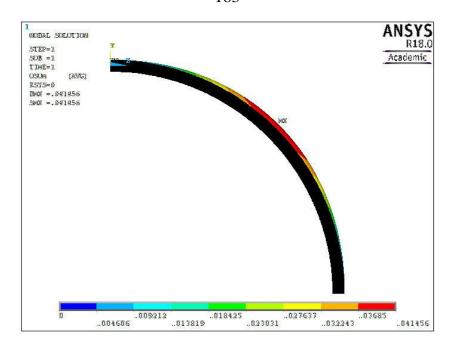


Рисунок 5.12 – Картина деформирования рукава с увеличенным в 10 раз модулем Юнга

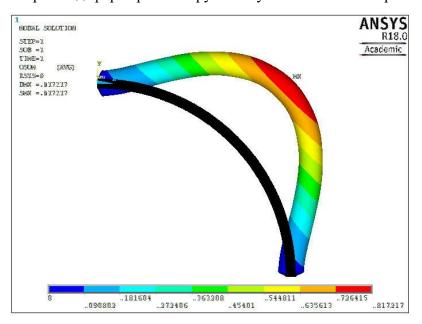


Рисунок 5.13 – Картина деформирования рукава с уменьшенной в 2 раз толщиной стенки

На рисунке 5.13 показана картина деформирования рукава для параметров, аналогичных расчету, приведенному на рисунке 5.9, но модуль толщины стенки рукава увеличен в 2 раза, вместо прежней толщины в 1 см используется толщина стенки в 5 мм.

По картинам перемещений видно, что максимальные перемещения линейно зависят от модуля упругости материала и пропорционально толщине стенки рукава, что характеризует рассматриваемый модельный пневморукав

как объект с низкой изгибной жесткостью, работающий больше на растяжение-сжатие.

Таким образом, построенная математическая и параметрическая конечноэлементная модель криволинейного участка гибкого пневморукава, ввиду доказанной ее адекватности и точности будет использована далее для анализа контактных взаимодействий между рукавом и стенкой. Созданная параметрическая КЭ-модель рукава должна использоваться для предварительной оценки пригодности выбираемых на этапе рабочего проектирования конструкторских решений.

5.3. Моделирование нормальных напряжений на шахтную вентиляционную перемычку при изменяющемся давлении воздуха в различных сечениях горных выработок калийных рудников

5.3.1. Расчет нагрузок на шахтную вентиляционную перемычку от давления воздуха

Ввиду того что горные выработки калийных рудников обладают достаточно большим сечением (в основном проходятся комбайном «Урал-20Р», сечение горной выработки составляет 20,2 м²) на ШВП будет действовать давление, значительное по своей величине. При этом в разных участках ШВП это давление будет различным. В связи с этим необходимо определить максимально допустимое давление, которое будет выдерживать перемычка.

На рисунке 5.14 представлена модель, в которой сечение горной выработки перекрывается объектом, имитирующим ШВП.





Рисунок 5.14 — Пример перекрытия основной выработки, пройденной комбайном «Урал-20Р»

С целью создания альтернативного пути для движения воздуха в модели под углом 90°С к выработке, имитирующей выработку с перемычкой, подключается другая выработка. Эта выработка имеет в 2 раза меньшее сечение, чем выработка, в которой расположена перемычка, и имитирует смежные с ней участки, свободные для прохода воздуха.

Моделирование производилось для 6 расчетных случаев (РС): соответственно без перекрытия и с перекрытием 20, 40, 60, 80 и 100 %.

Исходные данные были заданы в качестве граничных условий (ГУ) пример распределения которых по расчетной модели приведен на рисунке 5.15. В зависимости от типа, ГУ были описаны следующим образом:

- «вход» используется величина массового расхода, при величине которого обеспечивается скорость воздуха 10 м/с при температуре 10°С;
 - «выход» открытая поверхность с абсолютным давлением 1 атм;
- «стенка» адиабатическая, гидравлически гладкая поверхность с «прилипанием» текучей среды.

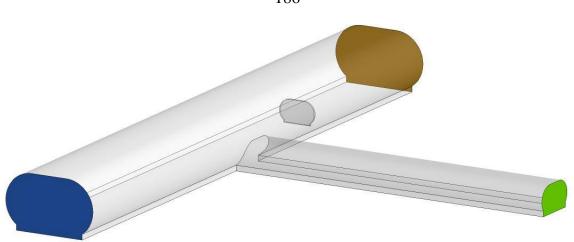


Рисунок 5.15 – Пример распределения ГУ

На рисунках 5.17—5.19 приведены изолинии скорости по газодинамическому тракту. Необходимо отметить, что при рассмотрении РС с некоторым перекрытием проходного сечения условной пластиной расчетное сечение проходило по центру препятствия в соответствии с рисунком 5.16.

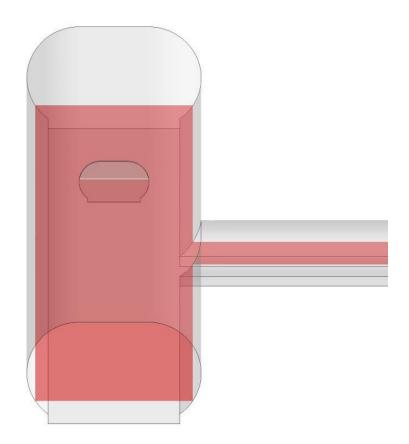


Рисунок 5.16 – Пример расположения секущей плоскости относительно перемычки

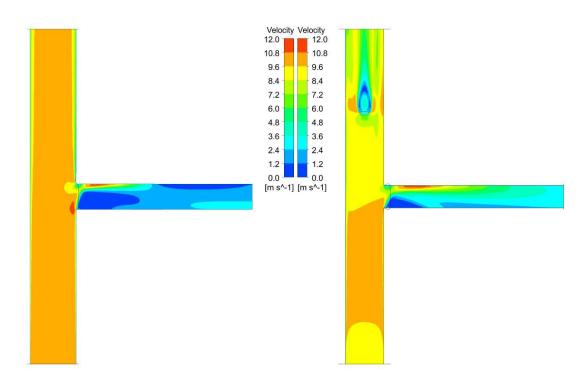


Рисунок 5.17 — Изолинии скорости для РС № 1 и № 2

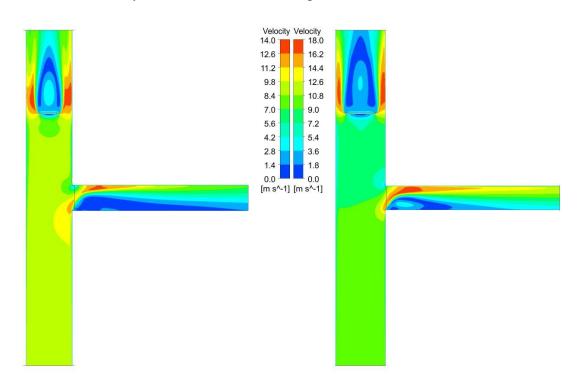


Рисунок 5.18 — Изолинии скорости для РС № 3 и № 4

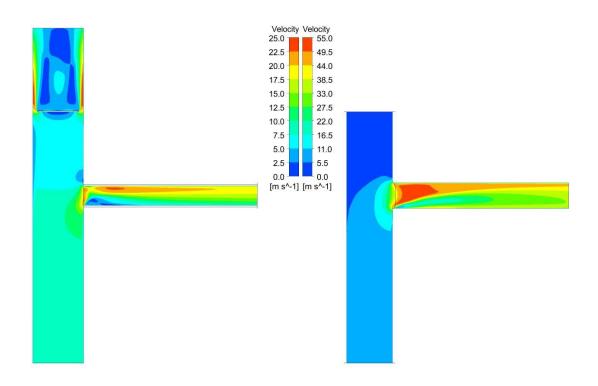


Рисунок 5.19 – Изолинии скорости для РС № 5 и № 6

Из полученных результатов (рисунки 5.17–5.19) следует, что по мере перекрытия проходного сечения главной выработки за перемычкой формируется область с низкоскоростным вихревым течением. При этом, по мере того как площадь живого сечения в основной выработке уменьшается, увеличивается массовый расход во вспомогательной выработке, что ведет к росту скорости движения воздуха. Из-за резкого поворота на 90° поток прижимается к верхней кромке вспомогательной выработки, что ведет к еще большему поджатию сечения из-за формирующейся вихревой зоны и, следовательно, к еще большему росту скорости.

В таблице 5.2 приведено распределение массового расхода воздуха в зависимости от перекрытия основной выработки.

В таблице 5.3 приведены результаты расчета по распределению величины избыточного давления и силы по оси на стороне набегания потока воздуха на препятствие (перемычку), пример которого представлен на рисунке 5.20. На рисунках 5.21–5.23 приведены изолинии избыточного давления на поверхности перемычки со стороны набегания потока воздуха и обратной стороны перемычки.

Таблица 5.2 – Распределение массового расхода воздуха в зависимости от перекрытия проходного сечения основной выработки (комбайн «Урал-20Р»)

Сечение	Вход	Выход	Выход
		(основная)	(вспомогательная)
Перекрытие, %	0		
Расход, кг/с	235,5	223,6	11,9
Относительный расход, %	100,0	95,0	5,0
Перекрытие, %	20		
Расход, кг/с	235,5	220,4	15,1
Относительный расход, %	100,0	93,6	6,4
Перекрытие, %	40		
Расход, кг/с	235,5	209,0	26,5
Относительный расход, %	100,0	88,8	11,2
Перекрытие, %	60		
Расход, кг/с	235,5	180,7	54,8
Относительный расход, %	100,0	76,7	23,3
Перекрытие, %	80		
Расход, кг/с	235,5	136,6	98,9
Относительный расход, %	100,0	58,0	42,0
Перекрытие, %	100		
Расход, кг/с	235,5	0,0	235,5
Относительный расход, %	100,0	0,0	100,0

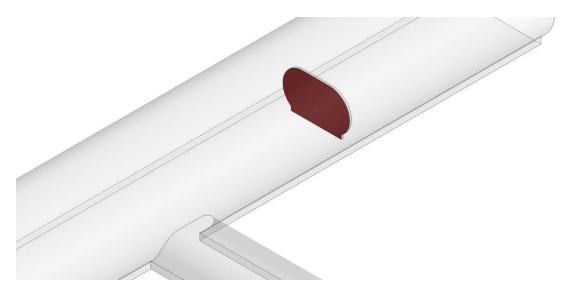


Рисунок 5.20 – Вспомогательная поверхность (перемычка) для оценки давления и силы

Результаты моделирования (рисунках 5.21–5.23 и таблица 5.3) свидетельствуют о неравномерности распределения давления по сечению ШВП. Наличие щели между поверхностью ШВП и горной выработкой в этом случае дает еще один негативный эффект. Когда воздух «просачивается» через неплотные участки за перемычку, создается ситуация классического резкого

сужения сечения для прохода воздуха. В этом случае отрицательная величина давления формируется по краям перемычки, а большая часть давления воздействует на центральную часть ШВП. При плотном прилегании контура перемычки к горной выработке по ее сечению давление потока воздуха распределяется равномерно и не превышает 1400 Па.

Таблица 5.3 – Распределение силовых параметров в зависимости от перекрытия проходного сечения (комбайн «Урал-20Р»)

PC	Избыточное давление на поверхность перемычки, Па	Сила, действующая на поверхность перемычки по оси, Н	Сила, действующая на перемычку, Н
1	0,0	0,0	0,0
2	37,1	29,5	44,9
3	52,0	165,3	278,8
4	105,4	754,7	1043,5
5	260,7	3317,9	3939,2
6	1383,6	27498,4	27498,4

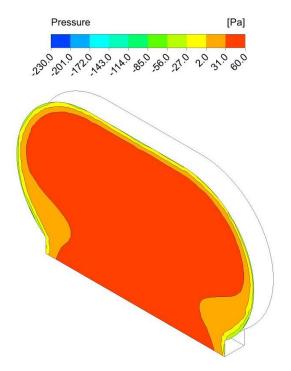


Рисунок 5.21 – Изолинии избыточного давления со стороны набегания потока воздуха для РС № 2

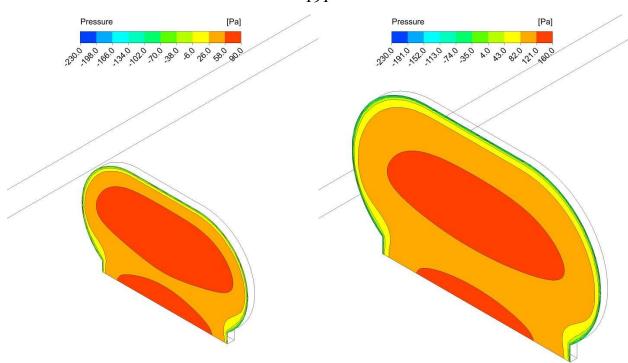


Рисунок 5.22 – Изолинии избыточного давления со стороны набегания потока воздуха для РС № 3 и № 4

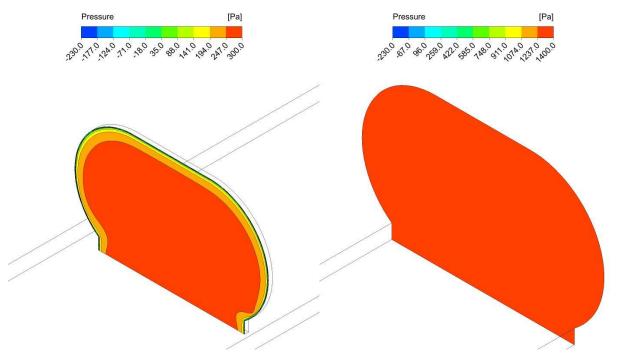


Рисунок 5.23 – Изолинии избыточного давления со стороны набегания потока воздуха для РС № 5 и № 6

Исследования показали, что от плотности прилегания пневморукава к горной выработке также зависит устойчивость ШВП при большой скорости потока воздуха.

5.3.2. Определение контактных усилий прижатия пневморукава к стенкам горной выработки

Ранее было показано, что на рукав, находящийся под внутренним давлением, на криволинейных участках действует дополнительная распределенная нагрузка, деформирующая рукав в сторону, противоположную центру кривизны (см. п. 5.2.4). Эта нагрузка обеспечивает эффект самоприжатия пневморукава к стенке горной выработки, что позволяет без дополнительных конструктивных решений обеспечить плотное примыкание гибких элементов ШВП к стенкам. Для оценки силы, с которой рукав будет прижиматься к стенке выработки, использовалась ранее созданная компьютерная конечно-элементная модель гибкого рукава. Однако в модель были добавлены контактные взаимодействия рукава с недеформируемой стенкой. Задача решалась с учетом нелинейности и больших деформаций.

При этом созданная модель ШВП является параметрической. Это означает, что ключевые геометрические размеры ШВП, свойства материалов, нагрузки и пр. задаются в виде переменных параметров, и изменение какогото одного из них (например диаметра сечения и т.д.) приводит к автоматическому перестроению созданной конечно-элементной модели. Такой подход позволяет в случае необходимости без существенных затрат создавать модели и проводить вычислительные эксперименты для различных рудников и шахт для произвольных сечений выработок.

На рисунке 5.24 показана расчетная 3D-модель пневморукава, контактирующего со стенкой горной выработки. Голубым цветом показан сам рукав, красным — участок поверхности выработки. Конечно-элементная модель не отражена по причине высокой дискретизации системы и мелкой сетки, требуемой для качественного описания геометрии рукава.

На рисунке 5.25 показано деформированное и первоначальное недеформированное состояния рукава, характеризующие поле перемещений точек рукава под внутренним давлением при наличии контактирующих поверхностей. Видно, что рукав имеет смещение относительно вертикальной плоскости

ШВП. Этот эффект объясняется тем, что контактируя с верхней недеформируемой стенкой выработки, рукав как единой целое испытывает сжимающие нагрузки, что приводит к потере устойчивости рукава, потери им первоначальной формы и отклонения от вертикали. Проявление эффекта оказалось возможным благодаря построению 3D-модели и решению задачи в полноценной трехмерной постановке без жестких ограничивающих гипотез.

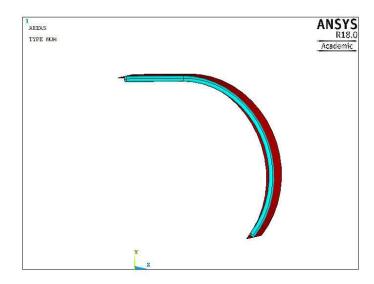


Рисунок 5.24 — 3D-модель рукава и поверхности выработки

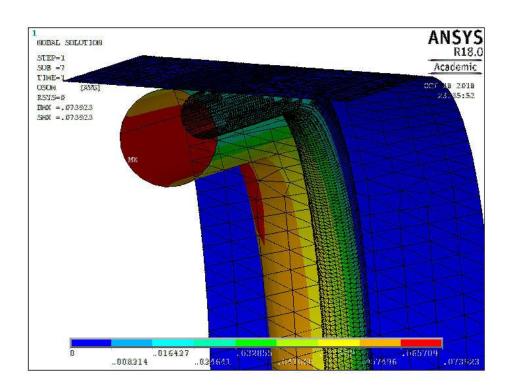


Рисунок 5.25 – Деформированное и недеформированное состояния рукава

На рисунке 5.26 показано распределение контактного давления, возникающего между пневморукавом и стенкой горной выработки. Явно видно, что на верхнем горизонтальном участке пневморукав не прижимается с достаточным усилием естественным образом к поверхности. Это означает, что на достаточно длинных прямолинейных (горизонтальных и вертикальных) участках требуется предусмотреть дополнительные промежуточные опоры, обеспечивающие прижатие рукава к стенкам. На криволинейном участке создается среднее контактное давление около 15–18 кПа. Недостаточно большой уровень контактных напряжений объясняется смещением рукава относительно вертикальной плоскости ШВП.

Повторный расчет распределения контактного давления проводился при запрещении пневморукаву смещаться относительно вертикальной плоскости. В реальной конструкции это будет обеспечено за счет того, что рукав находится в определенных местах в специальных пазах силового каркаса и прижимается в этих местах к стенкам выработки.

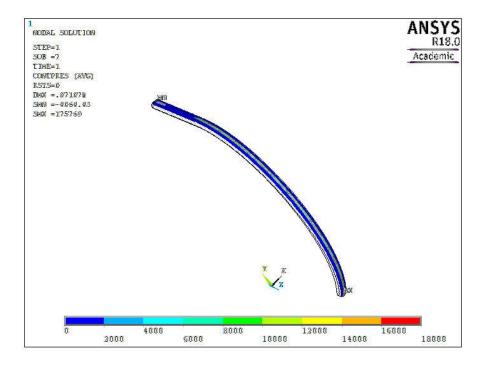


Рисунок 5.26 — Распределение контактного давления между рукавом и стенкой выработки без учета контактного трения

Распределение контактного давления без смещения рукава показано на рисунке 5.27. На криволинейном участке между рукавом и стенкой выработки создается среднее контактное давление около 26 кПа. В пересчете на погонные усилия это составляет примерно 600 Н на каждый метр искривленного по дуге окружности участка.

На рисунке 5.28 приведен так называемый статус контакта, то есть зоны, в которых контактирующие поверхности либо сцеплены за счет силы трения покоя, либо контактируют друг с другом с проскальзыванием, либо находятся близко, но с небольшим зазором между поверхностями (при анализе использовался коэффициент трения покоя, равный 0,35). Численный анализ показал, что в зоне контакта обеспечивается контакт с прилипанием. Это означает, что рукав под давлением без дополнительной нагрузки от потока воздуха прилегает к стенке выработки, а силы прижатия достаточно для того, чтобы жестко зафиксировать его. Контакт с проскальзыванием реализовывался только на горизонтальном верхнем участке. Именно в этих местах требуется обязательная дополнительная фиксация рукава силовым каркасом перемычки.

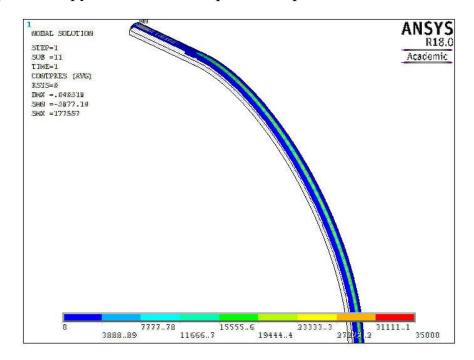


Рисунок 5.27 — Распределение контактного давления между рукавом и стенкой выработки с учетом контактного трения

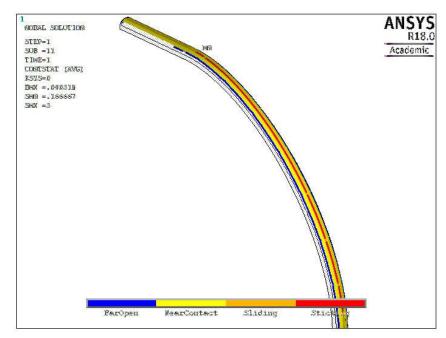


Рисунок 5.28 – Статус контакта между рукавом и стенкой выработки

Расчет, проведенный для внутреннего давления в рукаве, равном $1\cdot10^5$ Па, показывает, что в этом случае погонное усилие прижатия пневморукава к стенке горной выработки составляет примерно 250 Н на каждый метр искривленного по дуге окружности участка.

Оценочный расчет прижимающей нагрузки для рукава под внутренним давлением, равным $1 \cdot 10^5$ Па, но с увеличенной в 10 раз жесткостью (моделирование рукава из другого материала, армированного рукава, рукава большей толщины), показывает, что в этом случае погонное усилие прижатия рукава к стенке выработки составляет примерно 290 Н на каждый метр искривленного по дуге окружности участка.

Компьютерное моделирование и оценочные расчеты показывают, что на криволинейных участках обеспечивается самоприжатие гибкого рукава под внутренним давлением к стенкам выработки. На горизонтальных участках, где в пневморукаве отсутствует дополнительная восстанавливающая сила, контактные давления малы и требуются дополнительные конструктивные решения для обеспечения надежного контакта рукава со стенкой горной выработки. Для рукава, выполненного из резиноподобного материала, прижимное усилие при давлении 2·10⁵ Па составляет около 600 Н на метр. Уменьшение давления в рукаве

или изменение жесткостных характеристик рукава приводит к пропорциональному изменению прижимного усилия. Лучшее прижатие рукава будет обеспечиваться при большем давлении при гибком пневморукаве. Однако следует учитывать, что податливый рукав под действием внутреннего давления будет заметным образом деформироваться, увеличивая площадь своего поперечного сечения. Пневморукав будет отрываться от стенки выработки под действием давления набегающего воздуха, если приходящиеся на него со стороны прикрепленного к нему полотна нагрузки превысят силу трения между прижатым рукавом и поверхностью горной выработки.

Таким образом, по результатам исследований и расчетов были предложены следующие решения:

- 1. Для обеспечения лучшего прилегания перемычки к стенкам горной выработки необходимо использовать пневморукав с низкой изгибной жесткостью.
- 2. Пневморукав должен обладать свойствами существенного изменения поперечного сечения под давлением для лучшей передачи распирающих усилий от опоры к стенке горной выработки.
- 3. На горизонтальных и вертикальных прямолинейных участках следует предусмотреть дополнительные точки (площадки) для крепления пневморукава.
- 4. На криволинейных участках места крепления пневморукава к каркасу перемычки делать не реже чем через 45 градусов.

5.4. Расчет прочности конструкции шахтной вентиляционной перемычки и ее отдельных элементов

5.4.1. Математическая постановка задачи деформирования силового каркаса шахтной вентиляционной перемычки

Для постановки задачи первоначально необходимо описать ее математическую постановку, которая связана с деформированием балочно-стержневой конструкции в общем виде. Общность вызвана тем, что конкретные математические выражения присутствуют уже естественным образом в формулировках метода

конечных элементов применительно к конкретной геометрии, построенной встроенными средствами ANSYS на этапе препроцессинга.

Предложенная ШВП рассматривается как набор соединенных между собой определенным образом балок (стержней), а также гибкой пластины, описывающей работу тканевого материала. Балочно-стержневые элементы ШВП могут работать как на растяжение-сжатие, так и на сложный изгиб с кручением. Отдельно записывались определяющие соотношения для каждого типа деформирования элементов ШВП в форме [313–315], как это сделано в исследованиях [316, 317].

Изгиб элементов ШВП

Расположение точек в элементах ШВП, работающих на изгиб, и их перемещения рассмотрены вдоль локальной системы координат (ось Ox).

Прогиб элемента вдоль оси Oz, перпендикулярной Ox, обозначен через $w^{B}(x)$, а прогиб в направлении Oy – через $v^{B}(x)$.

Независимо для двух взаимно перпендикулярных направлений деформирования вдоль осей y и z, уравнения изгиба элементов ШВП (записанных независимо) представим как:

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(EJ_y \frac{\partial^2 w^B(x)}{\partial z^2} \right) = p_1(x), \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(EJ_z \frac{\partial^2 v^B(x)}{\partial y^2} \right) = p_2(x), \tag{5.31}$$

где $p_1(x)$ — нагрузка, действующая в направлении оси Oz, $p_2(x)$ — нагрузка, действующая в направлении оси Oy, E — модуль Юнга, J_z — момент инерции сечения балки относительно оси Oz, J_y — момент инерции сечения балки относительно оси Oy.

Геометрические соотношения:

$$\varepsilon_z = -z \frac{d^2 w^B}{dx^2}, \ \varepsilon_y = -y \frac{d^2 v^B}{dx^2}.$$

Ввиду того что изгиб элементов и всего каркаса ШВП представляют собой линейно-упругую деформацию, для описания физических соотношений использовался закон Гука.

Растяжение-сжатие стержней

При описании процесса деформирования элементов ШВП, работающих на растяжение-сжатие, уравнение равновесия для них при условии малых деформаций примет вид:

$$EF\frac{\partial^2 u^S(x)}{\partial x^2} = -q(x), \qquad (5.32)$$

где q(x) — нагрузка, действующая вдоль оси Ox, E — модуль Юнга, F — площадь поперечного сечения элемента ШВП; $u^S(x)$ — смещение точки вдоль оси элемента ШВП.

Геометрические соотношения:

$$\varepsilon_x = \frac{du^S}{dx}.$$

Физические соотношения:

$$\sigma_x = E\varepsilon_x$$
, $\varepsilon_z = \varepsilon_y = -\mu \frac{\sigma_x}{F}$.

Кручение стержней

Обозначив положения точки элемента ШВП через x, уравнение равновесия описывается следующим образом

$$GJ_{p} \frac{\partial^{2} \varphi^{S}(z)}{\partial z^{2}} = m(z), \qquad (5.33)$$

где J_p – полярный момент сопротивления, $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ – модуль упругости

при сдвиге; $\varphi^{s}(z)$ – угол поворота сечения элемента ШВП.

Геометрические соотношения:

$$\Theta = \frac{d\Phi}{dz},\tag{5.34}$$

где Θ – относительный угол закручивания.

Физические соотношения:

$$\tau(\rho) = G\Theta\rho, \tag{5.35}$$

где $\tau(\rho)$ — касательные напряжения от кручения, ρ — расстояние от оси стержня до точки сечения.

В силу линейности решаемой задачи итоговое напряженно-деформированное состояние определяется на основании принципа суперпозиции, когда при условии малости деформаций и линейной упругости системы (как в части поведения материала, так и в части геометрических эффектов) итоговые смещения точек элемента каркаса ШВП в глобальной системе координат будут представлять собой сумму перемещений от различных форм деформирования.

Граничные условия

Кинематические граничные условия

При моделировании рассматривались два способа стыковки элементов ШВП: шарнирное закрепление, когда ограничены только лишь перемещения, но повороты не запрещены, и элементы конструкции могут вращаться вокруг некоторого центра, а также жесткое закрепление (например сварка, болтовое соединение), при котором ограничены как взаимные смещения двух элементов конструкции, так и их вращения относительно друг дуга, два элемента конструкции деформируются как единое целое.

Статические граничные условия

Анализ напряженно-деформированного состояния ШВП учитывал следующие типы характерных нагрузок: погонные нагрузки, распределенные вдоль некоторого элемента, к которым в том числе относятся и нагрузки, вызванные собственным весом конструкции; локальные или сосредоточенные усилия.

Внешние нагрузки, действующие на ШВП, моделируются путем соответствующего задания правой части в уравнениях равновесия (5.31). Таким же способом формулируются нагрузки в случае, когда напряженно-деформированное состояние возникает за счет собственного веса конструкции. В ряде случаев

сила тяжести раскладывается на две ортогональные компоненты, действующие одна вдоль элемента, а вторая перпендикулярно ему.

5.4.2. Создание конечно-элементной модели конструкции

Ввиду того что рассмотренные выше системы координат являются локальными, для их перехода в глобальную систему использовался пакет AN-SYS, этот переход производился автоматически в зависимости от пространственного расположения элемента перемычки.

На рисунке 5.29 представлена конечно-элементная модель силового каркаса ШВП, построенная по заданной на рисунке 5.30 конфигурации. Конструкция рассматривалась как набор соединенных между собой балочных конечных элементов, имеющих способность как изгибаться в двух направлениях, так и удлиняться и скручиваться. В качестве узловых неизвестных оставлены 3 перемещения и 3 угла поворотов. На рисунках модель каркаса представлена без растянутого полотна.

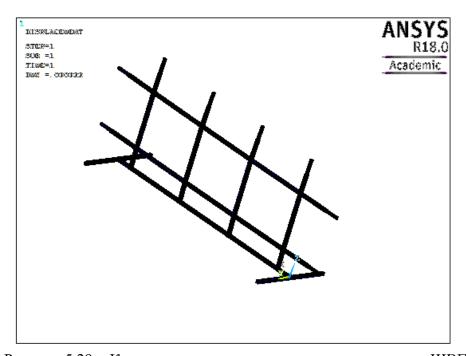


Рисунок 5.29 — Конечно-элементная модель силового каркаса ШВП

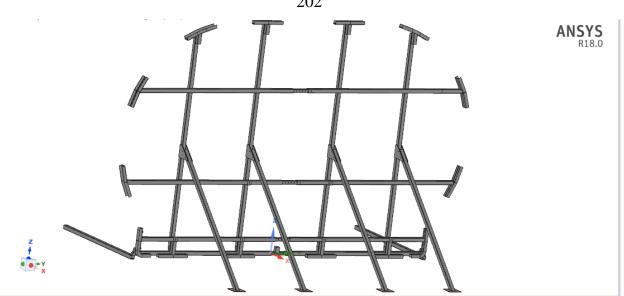


Рисунок 5.30 — Конфигурация силового каркаса, рассматриваемая на этапе эскизного проектирования

На рисунке 5.29 конечно-элементная модель ШВП показана без дополнительных упоров, поддерживающих центральную часть ШВП (отражены на рисунке 5.30). Наличие дополнительных жесткостных элементов учтено в модели ШВП при помощи введения ограничительных уравнений.

Конечно-элементная модель ШВП включает SHELL-элементы, при помощи которых моделируются тканевые элементы перемычки. При помощи SHELL-элементов (с настройкой, отключающей изгибную жесткость КЭ) рассчитывается и передается на силовой каркас давление от потока воздуха. С целью обеспечения наглядности конструкции, показанной на рисунке 5.29, не изображено полотно (в модели учтено).

5.4.3. Анализ напряженно-деформированного состояния шахтной вентиляционной перемычки без дополнительных упоров и примыкания к стенкам выработки

Первоначально в расчете рассматривался случай, когда ШВП установлена без дополнительных наклонных элементов каркаса, соединяющих центральную часть силового каркаса ШВП и нижнюю поверхность выработки. Кроме того, принимается, что весь периметр ШВП является не закрепленным. Данный расчетный случай реализуется, например, в момент установки ШВП, когда не все

угловые упоры жестко зафиксированы, а пневморукав не накачен и не созданы сжимающие усилия в силовом каркасе ШВП. Поле перемещений для рассматриваемого расчетного случая показано на рисунке 5.31.

Видно, что максимальные перемещения свободного верхнего края ШВП составили более метра, что говорит о низкой жесткости конструкции и невозможности ее работы при максимальном расчетном давлении. Необходимы меры дополнительного закрепления ШВП в сечении выработки. Следует заметить, что если ШВП устанавливается при меньших давлениях потока воздуха, то столь больших отклонений края ШВП не будет, конструкция может быть установлена штатно.

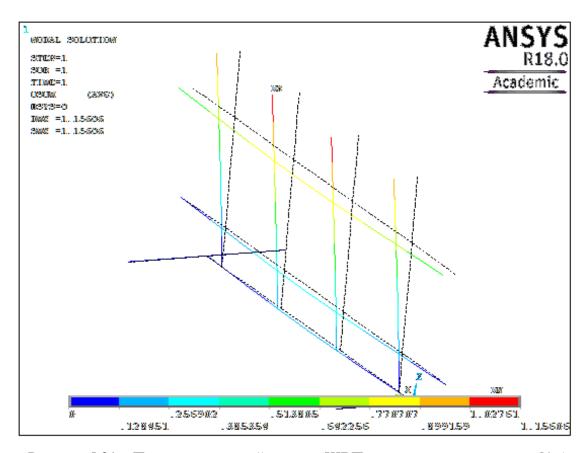


Рисунок 5.31 – Поле перемещений каркаса ШВП для расчетного варианта № 1

Второй рассматриваемый случай — когда ШВП смонтирована с дополнительными наклонными элементами, передающими нагрузку с центральной части ШВП на нижнюю поверхность выработки.

Поле перемещения ШВП, реализующееся в рассматриваемом расчетном варианте, приведено на рисунке 5.32.

Максимальные перемещения точек ШВП составили около 3 сантиметров, что не критично для конструкции рассматриваемых размеров и конфигурации (рамно-стержневая конструкция), если выполняются условия прочности.

Вычисленные возникшие в конструкции напряжения по Мизесу для расчетного варианта № 2 составили 100 МПа. Такой предел меньше предела текучести даже для дюралюминиевых сплавов (например АД31Т1) [318, 319], и составляет 130–150 МПа. Тогда для предлагаемой конструкции в рассматриваемом расчетном случае обеспечивается запас прочности 1,3–1,5.

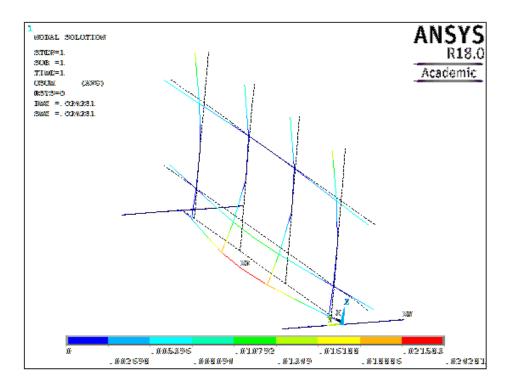


Рисунок 5.32 – Поле перемещений каркаса ШВП для расчетного варианта № 2

Следует заметить, что расчетный вариант № 2 целесообразно рассматривать как основной режим эксплуатации ШВП. Обеспеченная прочность конструкции позволяет при выборе давления в гибком рукаве, расположенному по периметру силового каркаса, руководствоваться не требованием как можно сильнее сжать силовой каркас, чтобы возникающие при этом силы трения между каркасом, гибким рукавом и стенкой выработки достигли величины,

при которой обеспечивается жесткая фиксация каркаса, а необходимостью обеспечить просто плотное примыкание гибкого рукава к поверхности выработки без зазора. Во втором случае создаваемое внутри гибкого рукава давление может быть меньше.

В рассматриваемом расчетном варианте происходит деформирование каркаса в сторону движения потока, то есть в направлении, перпендикулярном плоскости ШВП, при этом перемещения точек на периметре каркаса в плоскости самой ШВП достаточно малы (менее сантиметра), поэтому такие перемещения будут легко нивелированы гибким пневморукавом, то есть зазор между стенкой выработки и ШВП при деформировании последней образовываться не будет.

Случай, когда дополнительные упоры не установлены, но каркас зафиксирован в сечении выработки раздувшимся гибким пневморукавом, показан на рисунке 5.33.

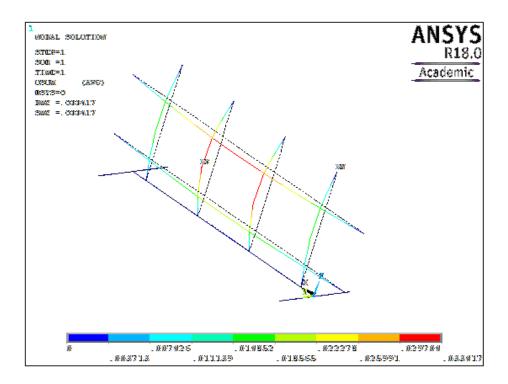


Рисунок 5.33 – Поле перемещений каркаса ШВП для расчетного варианта № 3

В рассматриваемом расчетном случае перемещения, как и ожидалось, достаточно малы, около 3 сантиметров, однако вычисленные максимальные

напряжения по Мизесу — 168 МПа, что больше предела текучести для рассматриваемого материала. То есть в данном расчетном варианте не обеспечена прочность конструкции.

Случай, когда дополнительные упоры установлены, и каркас зафиксирован в сечении выработки раздувшимся гибким рукавом, показан на рисунке 5.34.

В рассматриваемом расчетном случае перемещения самые наименьшие, максимальные напряжения по Мизесу — 50 МПа, что меньше предела текучести для рассматриваемом материала в 3 раза. В данном расчетном варианте обеспечена прочность конструкции.

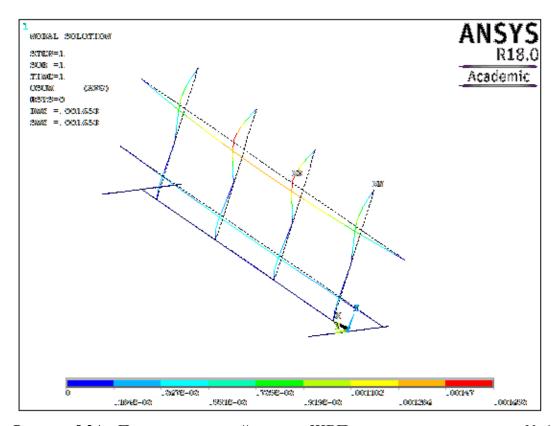


Рисунок 5.34 – Поле перемещений каркаса ШВП для расчетного варианта № 4

Таким образом, выполненные технические расчеты прочности шахтной вентиляционной перемычки и ее отдельных элементов показали, что для конструкции ШВП без дополнительных упоров не обеспечиваются условия прочности ни при каких вариантах ее установки в сечении выработки.

В варианте конструкции (см. рисунок 5.29) упоры присутствуют. Следовательно, конструкция способна выдерживать нагрузку потока воздуха (дымовых газов) с максимальной скоростью.

5.5. Результаты исследования опытного образца шахтной вентиляционной перемычки

Основываясь на результатах, полученных в ходе математического моделирования данных, каждый из элементов конструкции ШВП был разработан отдельно.

Силовой каркас ШВП

В связи с тем что дюралюминиевый сплав выдерживает расчетные нагрузки (см. п. 5.4.3) потока воздуха при максимальной скорости, силовой каркас перемычки изготовлен из этого материала. Дюралюминий – легкий по сравнению с металлами, обладает требуемой прочностью, не подвержен коррозии и может использоваться в условиях подземного горнодобывающего предприятия. Марка дюралюминиевого сплава АДЗ1Т1 [318, 319].

Материал обладает антикоррозийной стойкостью в водных растворах и хорошо себя зарекомендовал в агрессивных атмосферных условиях.

Выдерживаемый диапазон температур 470–510 °C.

Из профилей прямоугольного сечения были получены сварные конструкции, предназначенные для дальнейшей сборки в силовой каркас (рисунок 5.35).

Для того чтобы добиться максимального повторения контура выработки, в конструкции предусмотрены пазы 6 (рисунок 5.35), которые крепятся на вертикальные 2 и горизонтальные 4 стойки и изогнуты по контуру сечения выработки.

В ходе математического моделирования было установлено, что давление, которое будет оказывать на ШВП поток воздуха, способно перевернуть конструкцию. Во избежание подобной ситуации в конструкции силового каркаса ШВП предусмотрены упоры 2, которые будут обеспечивать стойкость перемычки.



Рисунок 5.35 — Опытный образец силового каркаса ШВП: 1 — основание; 2 — упоры; 3 — вертикальные стойки; 4 — горизонтальные стойки; 5 — лыжные салазки; 6 — пазы, выполненные по конфигурации выработки

С целью устранения проблемы поступления воздушного потока или дымовых газов с другой стороны перемычки на ее обратной стороне располагаются салазки *5* (см. рисунок 5.35).

Основание 1 перемычки имеет возможность поворота вокруг своей оси. В этом случае на этапе установки перемычки к пазам 6, расположенным в нижней ее части, есть доступ.

Горные выработки со временем проседают в области кровли и боковых стенок. В связи с этим даже выработки, пройденные одним комбайном, могут с течением времени иметь разные габаритные размеры.

Для того чтобы перемычка могла применяться в условиях различных сечений горных выработок, в ее конструкции вертикальные 3 и горизонтальные 4 стойки, выполнены с возможностью раздвижения.

Противопожарное полотно

Проблема при выборе противопожарного полотна заключалась в том, что оно должно было обладать не только свойствами огнестойкости и выдерживать температуру открытого огня, но и хорошими изоляционными свойствами, т.е. не позволяло диффундировать через него воздуху и дымовым газам.

Базальтовая ткань БТ-11 изготавливается из базальтового ровинга или нитей, кручёных на замасливателе. В этом материале непроницаемость воздуха обеспечивается противопожарными пропитками и присадками. Ткань используется при температуре от -250 °C до +650 °C. Температура плавления 1100 °C.

Настоящая ткань применяется при проведении сварочных работ в качестве термоизоляции, для огнезащиты и термоизоляции. Также ткань БТ-11 используется для обкладки теплоизоляционных матов, применяемых на предприятиях атомной промышленности и энергетики. В строительстве указанная ткань используется при производстве конструкционных элементов как замена Е-стекла.

Пневморукав

На основании проведенного математического моделирования были установлены требуемые параметры пневморукава, оптимальный его радиус, толщина стенки, а также величина внутреннего давления. Указанными свойствами обладает резина К 06128 Д.

Внешний вид пневморукава, изготовленного из указанной выше марки резины, приведен на рисунке 5.36, a.

Закачка воздуха в пневморукав происходит под давлением. Для того чтобы обеспечить безопасность этого в конструкции предусмотрен предохранительный сбросной клапан 1 (рисунок 5.36, δ).





Рисунок 5.36 – Пневморукав ШВП: a – внешний вид; δ – клапан для подачи воздуха

Ввиду того что пневморукав располагается под противопожарным полотном, при использовании перемычки он не будет иметь контакта с огнем и дымовыми газами (нагретым или охлажденным воздухом). Следовательно, к нему и материалу, из которого он выполнен, не требуется применение требований по противопожарным условиям.

Все элементы конструкции опытного (экспериментального) образца ШВП могут использоваться как в штатном, так и в аварийном (при возникновении пожара) условиях.

С целью проведения испытаний опытного образца в реальных условиях рудника была разработана методика [320], согласно которой определен следующий порядок экспериментов.

В первом опыте температура, давление и расход воздуха определяются в точках замера 1, 2 и 3 (рисунок 5.37).

Указанные параметры воздуха измеряются в транспортном штреке 1 в точке замера 1 и в камерах 2 (точки замера 2 и 3). Таким образом, количество поступившего воздуха по транспортному штреку (точка замера 1) должно рав-

няться сумме объемных расходов исходящих из него потоков воздуха. Объемный расход воздуха в камерах определяется путем замера, а в транспортном штреке за камерами — как остаток, полученный в ходе вычитания из объемного расхода воздуха, найденного в точке замера 1, объемных расходов воздуха в точках замера 2 и 3 (см. рисунок 5.37). Температура и давление в этих точках измеряется, но по сути они должны быть одинаковыми по величине.

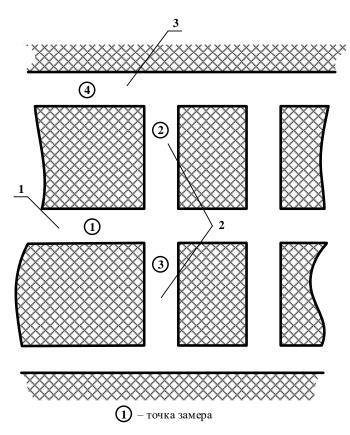


Рисунок 5.37 – Измерения в опыте № 1: I – транспортный (выемочный) штрек; 2 – камера; 3 – вентиляционный штрек

Одновременно с этими замерами другим участником эксперимента производится замер в точке 4 в вентиляционном штреке 3. Здесь общее количество исходящего по вентиляционному штреку 3 воздуха (точка за камерой 2) найдется как сумма объемных расходов в точках замера 2 и 4.

Таким образом, в результате первого эксперимента определяется воздухораспределение при отсутствии ШВП, т.е. без принудительных изменений в его движении. Следует учитывать, что при проветривании подземных горных выработок зачастую используются дополнительные источники тяги, например, вентиляторы местного проветривания (ВМП). Такой способ проветривания применяется при проходке тупиковой камеры, т.е. когда нет сквозного соединения камеры и вентиляционного штрека.

В этом случае за счет работы ВМП в одну из камер будет поступать большее количество воздуха. Подобный случай рассмотрен в опыте № 2 (рисунок 5.38). Исключение состоит в том, что камера в этом опыте все-таки сквозная. В нашем случае это необходимо знать, для того чтобы понять, как влияет источник тяги на распределение воздуха.

Измерения в выработках опыта № 2 производятся аналогично таковым в опыте № 1.

Интерес в этом случае представляет процесс изменения объемного расхода в камере 2 за счет работы ВМП 4 (см. рисунок 5.38).

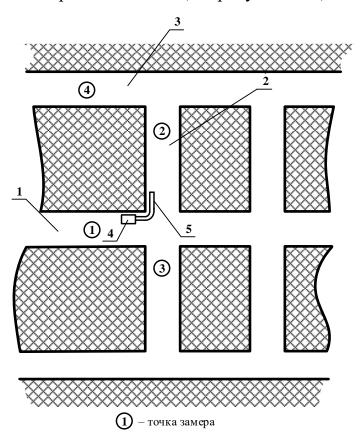


Рисунок 5.38 – Измерения в опыте № 2: I – транспортный (выемочный) штрек; 2 – камера;

^{3 –} вентиляционный штрек; 4 – вентилятор местного проветривания; 5 – трубопровод

Во всех случаях испытания следует проводить в выработке, пройденной одним ходом комбайна.

Таким образом, в опыте № 2 определяется характер изменения воздухораспределения за счет положительного регулирования, т.е. за счет принудительной закачки воздуха в камеру.

В следующем опыте (№ 3) определяется эффективность применения перемычки. Для этого она (ШВП) устанавливается на пути движения воздуха в камере 2 (см. рисунок 5.39), т.е. в том месте, куда принудительно закачивается воздух ВМП 4.

Здесь интерес представляет воздухораспределение не только за ШВП, но и в соседней камере (точка замера 3).

Часть воздуха, который не попал в камеру 2 и смежную с ней камеру, неизбежно попадет далее в транспортный штрек I и далее через отработанную камеру в вентиляционный штрек 3.

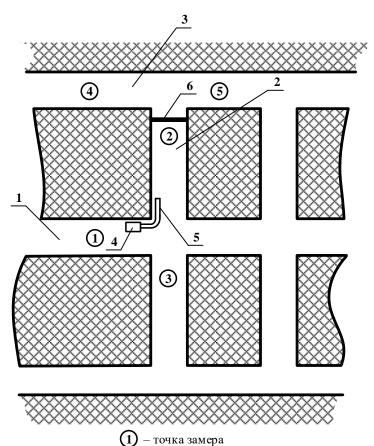


Рисунок 5.39 — Измерения в опыте № 3: *1* — транспортный (выемочный) штрек; 2 — камера; *3* — вентиляционный штрек; *4* — вентилятор местного проветривания; 5 — трубопровод; *6* — шахтная вентиляционная перемычка

Объемный расход воздуха, прошедшего мимо остальных камер (утечки), находится в точке замера 5, а утечки через ШВП — в точке замера 3 (см. рисунок 5.39).

Также необходимо сравнить, как изменился при этом расход в смежной камере по сравнению с опытом, когда перемычка отсутствовала.

Далее, при проведении опыта № 4, увеличивается нагрузка на ШВП. Для этого рукав 5, по которому из ВМП 4 подается воздух в камеру 2, продвигается на половину длины всей камеры, и во всех точках снова определяется объемный расход воздуха (рисунок 5.40).

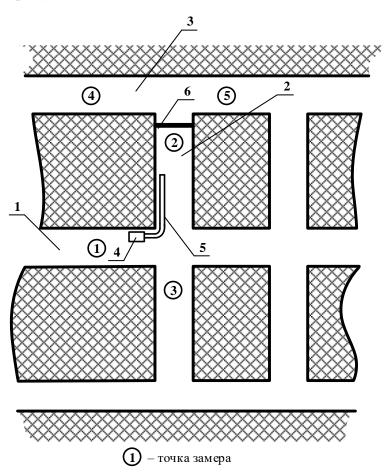


Рисунок 5.40 — Измерения в опыте № 4: 1 — транспортный (выемочный) штрек; 2 — камера; 3 — вентиляционный штрек; 4 — вентилятор местного проветривания; 5 — трубопровод; 6 — шахтная вентиляционная перемычка

Здесь интересно, насколько ШВП будет справляться с увеличением на нее нагрузки за счет повышения давления набегающего потока воздуха. Также любопытно изменение воздухораспределения в смежной камере и вентиляционном штреке.

В заключительном опыте (опыт N_2 5) главным образом определяются изоляционные свойства ШВП и особенно места ее «негерметичности».

Для этого трубопровод 5 ВМП 4 протягивается максимально близко к ШВП и действует на нее во всех возможных точках (рисунок 5.41).

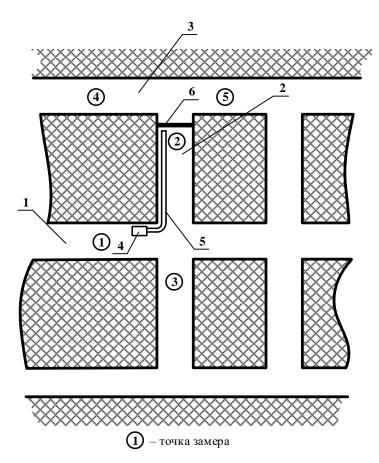


Рисунок 5.41 — Измерения в опыте № 5: I — транспортный (выемочный) штрек; 2 — камера; 3 — вентиляционный штрек; 4 — вентилятор местного проветривания; 5 — трубопровод; 6 — шахтная вентиляционная перемычка

Измерения объемного расхода в настоящем опыте производится аналогично опытам № 3 и 4. Однако в этом опыте трубопроводом струя воздуха направляется во все места ШВП и измерения объемного расхода воздуха производятся в этих точках за перемычкой.

В случае если полученных результатов эксперимента недостаточно для определения изоляционных свойств ШВП, измерения производятся в главном вентиляционном штреке.

Перед проведением опытов в главном вентиляционном штреке необходимо убедиться, что во время испытаний в нем будет отсутствовать движение транспорта.

Перед установкой и сразу после установки (за перемычкой и перед ней) измеряется температура, скорость и давление воздуха. Далее эти замеры выполняются каждые 20–30 минут на протяжении 4 часов.

Испытания проводились группой из 5 человек в разных участках рудника БКПРУ-2 (ПАО «Уралкалий»).

Для измерений в горных выработках были устранены все посторонние мешающие факторы, а также было обеспечено отсутствие люде за местом измерений.

Перемычка возводилась путем поднятия ее за упоры, поскольку при этом поток воздуха способствовал поднятию ее в вертикальное положение (рисунок 5.42).





б

Рисунок 5.42 — Внешний вид ШВП: a — со стороны движения потока воздуха; σ — с обратной стороны потока воздуха

После возведения ШВП (рисунок 5.43) при помощи раздвигающихся стоек и пневморукава она плотно прижалась к стенкам, кровле и почве горной выработки.

Результаты экспериментов в добычном участке приведены в таблице 5.4.



Рисунок 5.43 — Прижатие пневморукава: a — к почве; δ — к стенке горной выработки

Таблица 5.4 – Результаты экспериментов в добычном участке

	Точка	Параметр воздуха			
№ опыта		Скорость	Давление P ,	Температура <i>T</i> ,	Сечение S , м ²
	измерения	движения U , м/с	Па	°C	
1	1	1,68	101 690	11,2	15,7
	2	0,80	101 662	12,4	
	3	0,73	101 660	12,3	
	4	0,88	101 653	11,8	
2	1	2,12	101 691	11,2	15,7
	2	1,60	101 664	12,3	
	3	0,40	101 657	12,3	
	4	1,68	101 650	11,8	
3	1	1,63	101 682	11,6	15,7
	2	0,07	100 301	12,0	
	3	0,91	101 668	12,3	
	4	0,64	101 661	11,4	
	5	0,64	101 656	11,8	
4	1	1,66	101 683	11,6	15,7
	2	0,08	100 304	12,0	
	3	0,88	101 671	12,3	
	4	0,70	101 664	11,4	
	5	0,70	101 657	11,8	

Окончание табл. 5.4

	Точка измерения	Параметры воздуха			
№ опыта		Скорость	Давление P ,	Температура T ,	Сечение S , м ²
		движения U , м/с	Па	°C	
5	1	1,69	101 684	11,7	
	2	0,12	100 303	12,1	
	3	0,73	101 675	12,4	
	4	0,82	101 666	11,4	15,7
	5	0,82	101 656	11,8	

Примечание. Точка измерения № 1 – транспортный штрек.

Точка измерения № 2 – камера № 1 (в ней предполагается размещение ШВП).

Точка измерения № 3 — камера № 1 (напротив камеры № 1).

Точка измерения № 4 – вентиляционный штрек (за камерой № 1).

Точка измерения № 5 – вентиляционный штрек (перед камерой № 1).

На всех этапах испытаний можно установить закономерности, от которых в дальнейшем будет зависеть эффективность работы перемычки.

Для этого первоначально производится «сухой» анализ эксперимента, а потом устанавливаются возможные причины.

Анализ проводился следующим образом:

- 1. Измеренные данные приводились к стандартным условиям и заносились в таблицу.
- 2. Записывались факты по воздухораспределению: в какой точке измерений и при каких условиях изменился расход воздуха, его температура и давление.
- 3. На основании этой картины делались выводы о причинах, вызвавших изменение параметров.

По описанному выше алгоритму приведены сначала «сухие» факты и возникающие условия.

Испытания шахтной вентиляционной перемычки были произведены в камере, пройденной комбайном «Урал-20Р» в один ход.

В ходе экспериментов поток воздуха создавался вентилятором местного проветривания ВМЭ-6, который передвигался от начала камеры до самой перемычки.

Скорость потока воздуха, исходящего из трубопровода вентилятора, составляла 11 м/с.

Измерения проводились в транспортном, вентиляционном штреках и в камерах. Как в смежной, так и в рабочей.

Из данных при проведении первого опыта (строка № 1 в таблице 5.4) видно, что в камерах наблюдается практически равный расход воздуха, что указывает на практически равное воздухораспределение между ними. Также видно, что в них температура воздуха имеет практически одно и то же значение. Следовательно, в этих выработках отсутствовали какие-либо факторы, которые смогли бы внести неточность при измерениях.

Во время второго опыта наблюдается увеличение в исследуемой камере на 0,12 м/с. С учетом сечения 15,7 м², этот объемный расход для камеры изменился довольно значительно (почти на 1,9 м³/с). Добиться этого получилось за счет подачи воздуха в камеру при помощи вентилятора местного проветривания.

Характерной особенностью при этом стал факт равной температуры в камерах. Скорее всего, это связано с точностью приборов, которые как раз имеют класс точности, равный 1.

В опыте № 3 в одной из камер была установлена перемычка, но вентилятор местного проветривания продолжал работать с той же производительностью, и его трубопровод находился на том же расстоянии, что и до установки перемычки.

При этом наблюдается, что расход воздуха за перемычкой снижается в 10 раз.

«Остатки» воздуха из камеры направились обратно в транспортный штрек и в камеру, находящуюся напротив той, в которой установлена перемычка.

Давление воздуха за шахтной вентиляционной перемычкой упало почти на 1000 Па, т.е. на нее в момент испытаний начала действовать искусственная депрессия.

Температура воздуха за перемычкой снизилась. Это можно объяснить тем, что за ней воздух практически остановился.

В опыте № 4 скорость воздуха за перемычкой практически не изменилась. И это притом, что трубопровод вентилятора местного проветривания поднесли к перемычке на расстояние середины камеры.

При этом значительно изменилась скорость воздуха в смежной камере, а в вентиляционном штреке осталась практически той же самой.

Это говорит о том, что перемычка создала условия, при которых воздух из камеры не стал диффундировать в вентиляционный штрек, а пошел по пути наименьшего сопротивления. Таким путем для него стал участок от вентилятора до перемычки и обратно, что также показывает высокие изоляционные свойства устройства.

Наконец, в опыте № 5 трубопровод вентилятора местного проветривания был поднесен практически вплотную к перемычке. Скорость воздуха за перемычкой увеличилась. При этом замеры делались как за рукавом, так и за полотном.

Результаты подтверждены протоколом испытаний (рисунок 5.44).

протокол испытаний	Результат испытания: В ходе испытаний установлено, что испытываемая шахтная
16 <u>1</u> α <u>03</u> » <u>ιιωλφ</u> 2019г.	вентиляционная перемычка (ШВП) соответствует заявленным требованиям: основнос
	сечение выработки перекрывается при помощи полотия, размещенного на силовом
IIAO «Уралкалий»	каркасе, которое прижимается к стенкам, кровле и почве горной выработки за счет ра
(нациеновоные придпримения)	мещенного по периметру перемычки пневморукава.
на объекте: БКПРУ-2	При измерениях скорости воздуха за исследуемой перемычкой установлено, что утечки
бъект испытания: Экспериментальный (опытный) образец быстровозводимой	воздуха через нее не ощущаются приборами. При направлении потока воздуха на пере-
ахтной вентиляционной перемычки	мычку при помощи вплотную расположенного вентиляционного рукава от
ахтной вентиляционной перемычки	вентилятора местного проветривания, наблюдаются незначительные утечки (в
оставлен комиссией;	пределах 5% от общего объема поступающего в камеру воздуха).
эставлен комиссиси.	В районе прижатого пневморукава утечек не наблюдается.
Іредставители ПАО «Уралкалий» — Директор по недропользованию Смирнов Э.В.	
(беленость, фемити, анадышты)	Выводы и рекомендации по улучшению работы системы: Испытания подтвердили
Главный горняк - начальник горного управления Харинцев А.В.	высокие изоляционные свойства ШВП и возможность ее применения в условиях
(должность, фанкови, кницьцалы)	калийных рудников.
	Для улучшения характеристик ШВП рекомендуется обратить внимание на следующее
(должноства, организация, фалистая, эксприяты)	1. Проработать варианты по снижению массы конструкции ШВП: как силового
forest metral deformation from an industrial	каркаса, так и пневморукава и полотна.
	2. Подобрать материал полотна, который способен будет снизить (исключить) утечки
Представитель ООО «ГВУ» Генеральный директор Николаев А.В.	через него воздуха.
(должноство, физиктия, анимисты)	3. Улучшить прочностные характеристики пневморукава.
а также иные представители лип, участвующих в освидетельствовании	
ORCHMEN AT BITS JUJUNE BILLS OF SOM JOHNE A. A.	Представурени IAO o parez mis-c
Сомиссией проведена работа по определению пригодиости объекта испытаний.	Napaniliwa, B
Испытание проведено в соответствии с требованиями методики: Программа и	Представиждь 900 м. ВУ
методика испытаний экспериментального образца шахтной вентиляционной	Наприясь А.В.
перемычки на руднике БКПРУ-2 НАО «Уралкалий», утвержденная 28.06.2019 г.	
Гинтельность испытания : 01.07.2019г. − 02.07.2019г.	
1	2
а	6

Рисунок 5.44 — Протокол испытаний ШВП: a — первая страница; δ — вторая страница

Согласно протоколу (рисунок 5.44), изоляционные свойства ШВП были доказаны. При этом приведены три замечания, не связанные с конструкцией перемычки, а лишь с материалами, из которых она изготовлена.

5.6. Выводы по разделу

В настоящей главе получены следующие результаты:

- 1. Разработаны конечно-элементные модели основных элементов быстровозводимой шахтной вентиляционной перемычки, которые можно использовать для любых типов сечений горных выработок.
- 2. Произведено математическое моделирование свойств быстровозводимой шахтной вентиляционной перемычки по надежному изолированию участка горной выработки, расположенного за ней, и выдерживанию напряжения давления потока воздуха, двигающегося с максимальной скоростью.
- 3. На основании произведенного математического моделирования разработана конструкция шахтной вентиляционной перемычки для калийных рудников, обладающих большим сечением (около 20 м²) и сложной конфигурацией.
- 4. Разработана методика и произведены испытания опытного образца шахтной вентиляционной перемычки нового типа, изготовленной на основании результатов математического моделирования, подтверждающие заявленные свойства предлагаемого устройства.

ГЛАВА 6. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА ГОРНОРАБОЧИХ В ДОБЫЧНЫХ УЧАСТКАХ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В НИХ

На шахтах и рудниках система кондиционирования воздуха (СКВ) применяется для охлаждения воздуха в рабочей зоне для обеспечения требуемых условий труда горнорабочих и для осушения воздуха, поступающего в горные выработки.

Повышенная температура воздуха в рабочей зоне наблюдается в глубоких шахтах и рудниках, а также на специфических месторождениях, например на нефтяных шахтах (нефтешахтах), в которых температура воздуха в добычных участках существенно выше установленной [321, 322]. Связано это с закачкой пара в нефтяной пласт (термошахтный способ добычи) [172, 173, 189] (см. п. 1.5.2).

При необходимости охлаждения воздуха в глубоких шахтах и рудниках устанавливать СКВ на поверхности нецелесообразно. Связано это с тем, что воздух при движении по горным выработкам нагревается за счет теплообмена с горным массивом. Поэтому на таких подземных горнодобывающих предприятиях используют в большинстве случаев СКВ, осуществляющие охлаждение воздуха непосредственно в добычном участке.

В этом случае нерешенной остается проблема централизованного управления такими объектами и их электроснабжения (затраты на закупку дорогостоящего кабеля и его прокладку).

На нефтяных шахтах температура воздуха в горных выработках весьма значима в области ведения добычи нефти (в буровой галерее уклонного блока), а также в вентиляционных выработках, в которые из этой области поступает воздух. Нефтяной пласт специально разогревают для снижения вязкости нефти, т.е. охлаждение воздуха и, соответственно, нефтяного пласта в бу-

ровой галерее нерационально с точки зрения эффективности добычи полезного ископаемого. Поэтому необходимо использовать новые способы улучшения условий труда в нефтяных шахтах.

На неглубоких рудниках и шахтах (до 500 м), где температура воздуха в горных выработках невысока, также рекомендуется использовать СКВ. Связано это с тем, что температура горных пород на неглубоких подземных горнодобывающих предприятиях сравнительно мала (7–12 °C). В этом случае при поступлении теплого воздуха в шахту (рудник) он охлаждается, и на стенках горного массива выпадает конденсат. Особенно негативные последствия этот процесс приносит в соляных рудниках, в которых при контакте солей и влаги образуется электролит, вызывающий быстрое разрушение оборудования, расположенного в руднике. Также выпадение влаги приводит к затоплению выработок, разрушению целиков. При выпадении влаги на конвейерной линии возникает пробуксовка конвейерной ленты барабане на (с возможностью ее воспламенения) и т.д.

В связи этим на рудниках и шахтах необходимо применять СКВ для обеспечения безопасных условий труда. Однако следует разделять два вышеупомянутых типа подземных горнодобывающих предприятий и разработать для каждого из них свою технологию и устройства.

6.1. Система кондиционирования воздуха для неглубоких рудников и технологические решения для рационального использования энергоресурсов на глубоких подземных горнодобывающих предприятиях

Процесс охлаждения воздуха является энергоемким, поэтому для снижения энергетических затрат часто предлагаются нетрадиционные способы воздухоподготовки в теплое время года: охлаждение воздуха льдом [184, 181], применение геотермальных насосов [192, 182], пропускание воздуха через выравнивающие каналы [323] и т.д. Однако полностью заменить традиционный способ кондиционирования воздуха в полной мере при помощи этих установок до сих пор не удалось. Поэтому для снижения затрат электроэнергии или

рационального ее использования при кондиционировании необходимо совершенствовать сам процесс воздухоподготовки в теплое время года, сделав его менее затратным с точки зрения энергосбережения.

6.1.1. Система кондиционирования воздуха на неглубоких рудниках и шахтах подземно-поверхностого типа

В ситуации, когда не получается снизить затраты на работу СКВ, можно использовать положительный эффект от самого процесса воздухоподготовки. Как было указано ранее, между шахтными стволами возникает общерудничная естественная тяга, которая зависит от параметров воздуха, поступающего в них, и существенно влияет на энергоемкость процесса проветривания. В связи с этим, изменяя местоположение самих воздухоохладителей (испарителей) СКВ, можно создать условия, при которых между стволами будет действовать положительная общерудничная естественная тяга, способствующая проветриванию. В результате подбора вариантов расположения испарителей СКВ был выбран оптимальный вариант, представленный на рисунке 6.1, названный поверхностно-подземной СКВ [324].

Испаритель СКВ на воздухоподающем стволе \mathbb{N} 1 (дальнем от вентиляционного ствола) располагается на поверхности, а испаритель на воздухоподающем стволе \mathbb{N} 2 — в подземной части рудника в околоствольном дворе.

Температура воздуха на выходе из СКВ, расположенной на воздухоподающем стволе № 1, должна быть меньше температуры, до которой воздух охлаждается в околоствольном дворе воздухоподающего ствола № 2. Такая ситуация будет способствовать возникновению между этими стволами положительной общерудничной естественной тяги.

Конденсаторы обеих СКВ размещаются в главных вентиляционных выработках, т.е. на входе в вентиляционный ствол (см. рисунок 6.1). В этом случае «сброс» нагретого в СКВ воздуха осуществляется в исходящую из рудника струю.

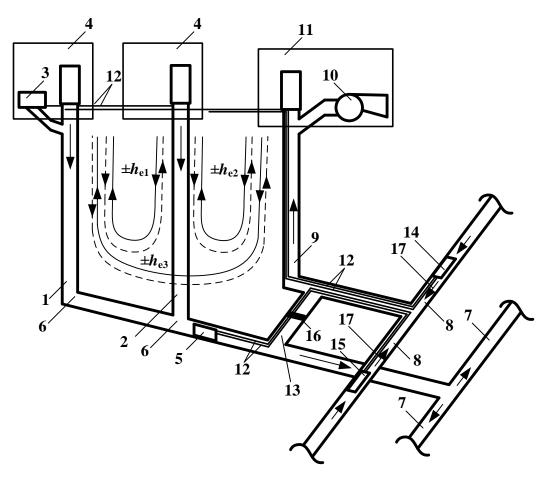


Рисунок 6.1 — Упрощенная схема проветривания рудника и расположение СКВ в нем: 1 — воздухоподающий ствол № 1; 2 — воздухоподающий ствол № 2; 3 — испаритель (воздухоохладитель) поверхностной СКВ; 4 — поверхностные комплексы воздухоподающих стволов; воздух, подаваемый в рудник; 5 — испаритель (воздухоохладитель) подземной СКВ; 6 — околоствольные дворы воздухоподающих стволов; 7 — полевые и пластовые горные выработки, не имеющие выхода на поверхность; 8 — главные вентиляционные выработки, подходящие к вентиляционному стволу 9; 9 — вентиляционный ствол; 10 — ГВУ; 11 — поверхностный комплекс ГВУ; 12 — трубопровод с хладоносителем; 13 — соединительная выработка; 14 — конденсатор поверхностной СКВ; 15 — конденсатор подземной СКВ; 16 — вентиляционная дверь; 17 — воздух, нагретый в конденсаторах 14 и 15

В этом случае возникают три положительных эффекта:

- 1. Увеличивается КПД СКВ, так как в конденсатор для охлаждения хладагента (хладоносителя) поступает охлажденный, но уже отработанный воздух.
- 2. Нагретый воздух не распространяется по горным выработкам, нарушая в них санитарно-гигиенические условия труда.
- 3. Исходящий теплый (легкий) воздух будет сам стремиться подняться вверх, в результате чего величина положительной общерудничной естественной тяги, способствующей проветриванию, увеличится.

Для определения влияния характеристик поверхностной и подземной СКВ предложенного способа кондиционирования шахтного воздуха на энергоэффективность воздухоподготовки необходимо уметь правильно рассчитывать изменяющиеся параметры воздуха при их работе.

При выборе испарителя подземной СКВ необходимо определить ее холодильную мощность ($q_{x,y}$) в зависимости от требуемого значения температуры охлаждения воздуха $T_{\rm B}$ в выработке, для чего может быть использована формула [325, 326]:

$$q_{x,y.}, \mathcal{L}_{x} = c_{V} \left(\frac{\partial \rho_{B} T_{B}}{\partial t} + \frac{1}{S_{B}} \frac{\partial \rho_{B} T_{B} Q_{B}}{\partial z} \right) - S_{B} \left[\frac{\lambda_{\text{\tiny IM}} \tau \sqrt{1 + 0.76 \sqrt{\frac{a_{\text{\tiny IM}} \tau}{r_{B}^{2}}}}}{0.5 \sqrt{\pi a_{\text{\tiny IM}} \tau} + \frac{2\lambda_{\text{\tiny IM}}}{\alpha_{0} \sqrt{\pi}} \sqrt{1 + 0.76 \sqrt{\frac{a_{\text{\tiny IM}} \tau}{r_{B}^{2}}}}} \right] \frac{\left(T_{\text{\tiny II}} - T_{\text{\tiny B}}\right)}{3600}, \quad (6.1)$$

где c_V — удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме, Дж/кг·°С; $\rho_{\rm B}(t,z)$ — плотность воздуха в выработке при требуемом значении температуры охлаждения воздуха $T_{\rm B}$, кг/м³; $S_{\rm B}$ — площадь поперечного сечения выработки, м²; $Q_{\rm B}$ — требуемая производительность испарителя, м³/с; $\lambda_{\rm rm}$ — коэффициент теплопроводности горного массива, Дж/кг·ч·°С; τ — время с начала работы установки, ч; $a_{\rm rm}$ — коэффициент температуропроводности горного массива, м²/ч; α_0 — коэффициент теплоотдачи (суммарный), Дж/м²·ч·°С; $r_{\rm B}$ — эквивалентный радиус выработки, величину которого можно найти как $r_{\rm B} = \sqrt{\frac{S_{\rm B}}{\pi}}$, м; $T_{\rm R}$ — температура неохлажденных горных пород (см. рисунок 6.2).

Для того чтобы влага не выпадала на стенках горного массива полевых и пластовых горных выработок, температура охлажденного воздуха должна быть равна температуре неохлажденных горных пород ($T_{\rm B} \le T_{\rm II}$) или меньше ее.

Явление вторичной конденсации при предложенном способе также будет отсутствовать вследствие «сброса» теплого воздуха из конденсаторов (подземной и/или поверхностной) СКВ в вентиляционный ствол, т.е. за счет нагрева воздуха в нем выше значения «точки росы» [323].

Таким образом, значение $T_{\rm B}$ будет определяться в зависимости от величины $T_{\rm II}$, которое согласно [184] зависит от глубины рудника ($H_{\rm P}$), температуры нейтральной зоны ($T_{\rm H.3.}$) и глубины ее залегания ($H_{\rm H.3.}$), а также геотермического градиента (σ):

$$T_{\rm B} = T_{\rm \Pi} = T_{\rm H.3.} + \sigma \left(H_{\rm p} - H_{\rm H.3.} \right).$$
 (6.2)

Однако следует учитывать тот факт, что в полевые и пластовые горные выработки, не имеющие выхода на поверхность 7, помимо охлажденного в испарителе подземной СКВ 5, будет поступать воздух из стволов 1 и 2, который, как сказано выше, будет нагреваться при спуске. В околоствольный двор 6, а следовательно, в испаритель 5 и в выработки 7 из ствола \mathbb{N} 1 будет поступать нагретый воздух. Также часть воздуха, поступающего по стволу 2, будет проходить полевые и пластовые горные выработки, не имеющие выхода на поверхность 7 минуя испаритель 5 (см. рисунок 6.1).

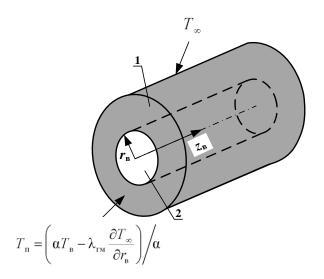


Рисунок 6.2 — Схема для определения количества тепла, выделяющегося с поверхности горного массива: 1 — горный массив; 2 — горная выработка эквивалентным радиусом $r_{\rm B}$; α — коэффициент теплообмена между рудничным воздухом и горным массивом; T_{∞} — температура горных пород на удалении от места расположения горного массива

Согласно выводу из формул работы [327], требуемую производительность испарителя подземной СКВ можно определить по формуле:

$$Q_{\rm B} = \frac{Q_{\rm p} \rho_{\rm p} I_{\rm p} - Q_{\rm cl} \rho_{\rm l} I_{\rm l} - Q_{\rm c2} \rho_{\rm 2} I_{\rm 2}}{\rho_{\rm B} I_{\rm B}},$$
(6.3)

где Q_p , Q_{c1} , Q_{c2} — объемные расходы воздуха, поступающего соответственно в полевые и пластовые горные выработки, не имеющие выхода на поверхность, первый и второй воздухоподающие стволы, M^3/c ; ρ_p , ρ_1 , ρ_2 — плотность воздуха соответственно, поступающего в полевые и пластовые горные выработки, не имеющие выхода на поверхность, в околоствольные дворы первого и второго воздухоподающего ствола, кг/ M^3 ; I_p , I_1 , I_2 — удельная энтальпия воздуха соответственно, поступающего в полевые и пластовые горные выработки, не имеющие выхода на поверхность, в околоствольные дворы первого и второго воздухоподающего ствола, кДж/кг; I_B — удельная энтальпия воздуха на выходе СКВ при требуемом значении I_B .

Плотность воздуха в i-й точке при известных значениях температуры (T_i) и барометрического давления (p_i) определяется по общеизвестной формуле:

$$\rho_i = \frac{0,465 \, p_i}{273,15 + T_i} \,. \tag{6.4}$$

Барометрическое давление и температуру воздуха в околоствольных дворах воздухоподающих стволов согласно [327] можно найти по формулам:

$$P_{o.o.} = a_1 \cdot p_a^{n_1} + a_2 \cdot T_{\text{ctb}}^{n_2} + a_3 \cdot H_{\text{ctb}}^{n_3} + a_4 \cdot D_{\text{ctb}}^{n_4} + a_5 \cdot Q_{\text{ctb}}^{n_5};$$
 (6.5)

$$T_{o.o.} = a'_{1} \cdot p_{a}^{n'_{1}} + a'_{2} \cdot T_{\text{CIB}}^{n'_{2}} + a'_{3} \cdot H_{\text{CIB}}^{n'_{3}} + a'_{4} \cdot D_{\text{CIB}}^{n'_{4}} + a'_{5} \cdot Q_{\text{CIB}}^{n'_{5}}, \tag{6.6}$$

где a_i , a'_i , b_i и b'_i – коэффициенты регрессии [13]; n_i , n'_i , m_i и m'_i – степени при параметре [13]; $T_{\text{ств}}$, $H_{\text{ств}}$, $D_{\text{ств}}$ и $Q_{\text{ств}}$ –температура воздуха, поступающего в воздухоподающий ствол (0 C), глубина (м), диаметр (м) воздухоподающего ствола и объем воздуха, поступающего в него, м 3 /с, соответственно.

Следует отметить, что в формулах (6.5) и (6.6) для воздухоподающего ствола за величину $T_{\text{ств}}$ принимается температура воздуха после смешивания наружного и охлажденного в испарителе поверхностной СКВ потоков [327].

Удельная энтальпия в i-й точке согласно [184] определяется по формуле

$$I_i = 1,005T_i + (2500 + 1,8T_i)\frac{d_i}{1000},$$
 (6.7)

где T_i , d_i – температура (0 С) и влагосодержание (${}^{\Gamma}$ /кг) воздуха в i-й точке.

Влагосодержание воздуха в i-й точке согласно [184] определяется по формуле

$$d_i = 623 \frac{\varphi_i p_{\Pi}}{P_i - \varphi_i p_{\Pi}}, \tag{6.8}$$

где ϕ_i – относительная влажность воздуха в i-й точке; p_{Π} – парциальное давление водяных паров при полном насыщении воздуха (мм рт. ст.) [328].

Следует учитывать, что испаритель подземной СКВ будет работать как эжектирующая установка, т.е. когда на выходе раскрывается под определенным углом θ струя воздуха и на некотором расстоянии заполняет все сечение выработки, действуя как пневматический поршень (рисунок 6.3).

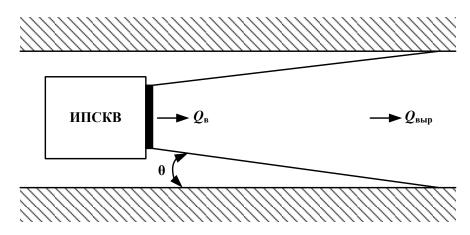


Рисунок 6.3 – Раскрытие струи (процесс эжекции) на выходе из испарителя подземной СКВ (ИПСКВ)

Согласно [104] общий поток в выработке при работе эжектирующей установки определяется по формуле

$$Q_{\text{выр}} = Q_{\text{B}} \sqrt[3]{B \cdot \Delta \cdot \left[\frac{\left(S_{\text{B}} - S_{\text{CKB}}\right)^2}{S_k^2} \cdot e - 1 \right]}, \tag{6.9}$$

где $\Delta = \rho_B/2g$, кг·с²/м²; g — ускорение свободного падения, м/с²; $S_{\rm CKB}$ — сечение, занимаемое испарителем СКВ, м²; S_k — сечение выходного отверстия испарителя

СКВ (начальное сечение струи воздуха), м²; e – коэффициент безразмерного за- 1,472 · D

паса струи, равный $e = \frac{1,472 \cdot D}{\left(2 \cdot b_c + 0,0029 \cdot D\right)}; D$ — диаметр выходного отверстия ис-

парителя СКВ, м; b_c – расстояние от оси испарителя СКВ до стенки выработки,

$$M; \ B = \frac{S_{_{\rm B}}^{\,2}}{\left(S_{_{\rm B}} - S_{_{\rm CKB}}\right)^2 \cdot \left[R_{_{\rm Bыp}} \cdot S_{_{\rm Bыp}}^{\,2} + 1{,}091 \cdot \Delta \cdot S_{_{\rm Bыp}}^{\,3} \cdot \sqrt{\left(\frac{R_{_{\rm B}}}{2 \cdot \Delta}\right)^3} - \Delta\right]}; R_{_{\rm B}} - аэродинами-$$

ческое сопротивление выработки, $(H \cdot c^2)/M^8$ [104].

Тогда требуемая производительность вентилятора испарителя подземной СКВ с учетом возникающего процесса эжекции найдется как

$$Q'_{B} = \frac{Q_{Bblp}}{\sqrt[3]{B \cdot \Delta \cdot \left[\frac{\left(S_{B} - S_{CKB}\right)^{2}}{S_{k}^{2}} \cdot e - 1 \right]}}.$$
(6.10)

В данном случае $Q_{\text{выр}} = Q_{\text{p}}$.

Также с целью снижения тепловых утечек от трубопровода с хладогентом необходимо рассчитать толщину теплоизоляционного слоя, которая согласно [329] определяется по формуле

$$\delta_{_{\rm MC}} = d_{_{\rm MC}}(B-1)/2, \tag{6.11}$$

где $d_{\rm uc}$ — внутренний диаметр изоляции, м; B — отношение внутреннего диаметра изоляции к внешнему, определяемое из равенства

$$B \ln B = \frac{2\lambda_{\text{\tiny MC}} \left[\left(T_{\text{\tiny H}} - T_{\text{\tiny B}} \right) / \left(T_{\text{\tiny H}} - T_{\text{\tiny p}} \right) - 1 \right]}{\alpha_{\text{\tiny M}} d_{\text{\tiny MC}}}, \tag{6.12}$$

где $\lambda_{\rm uc}$ — теплопроводность изоляционного слоя ккал/м·ч· 0 С; $T_{\rm H}$, $T_{\rm B}$ — температура соответственно воздуха в выработке (наружная) и стенок трубопровода с хладоносителем, $^{\circ}$ С; $T_{\rm p}$ — температура «точки росы», 0 С; $\alpha_{\rm H}$ — коэффициент теплоотдачи изоляционному слою от шахтного воздуха, ккал/м 2 ·ч· $^{\circ}$ С.

Подставив значения, полученные по формулам (6.2), (6.4) и (6.10) в формулу (6.1) получим значение требуемой хладопроизводительности (холодильной мощности) СКВ.

Также по формуле (6.9) можно определить объемный расход в главных вентиляционных выработках 10 после «сброса» теплого воздуха из конденсаторов СКВ 11, 12 (см. рисунок 6.1).

6.1.2. Обеспечение безопасных условий труда на глубоких рудника и шахтах

В глубоких рудниках и шахтах горные породы имеют высокую температуру, и охлаждать воздух необходимо непосредственно в рабочей зоне. При большой протяженности горных выработок обеспечить процесс воздухоподготовки на отдельных удаленных участках достаточно сложно. А ввиду того, что при изменении температуры воздуха в горных выработках изменяется величина тепловых депрессий, действующих между ними, в этом случае практически невозможно эффективно управлять процессом воздухораспределения.

Кроме того, существует проблема охлаждения нагретого в процессе работы СКВ хладоносителя. При его обдуве в конденсаторе теплым воздухом существенно снижается КПД работы системы воздухоподготовки. Следовательно, необходимо искать места расположения конденсатора СКВ, в которых хладоноситель будет эффективно охлаждать. Это влечет за собой увеличение протяженности трубопроводов с хладоносителем и, следовательно, дополнительные затраты на работу СКВ. Также необходимо обеспечивать «сброс» нагретого воздуха в горные выработки таким образом, чтобы в них не ухудшались санитарно-гигиенические условия труда.

В некоторых случаях работа СКВ вообще может привести к снижению эффективности процесса добычи полезного ископаемого. Например, в нефтешахтах с целью снижения вязкости добываемой нефти пласт разогревают путем закачки в него горячего пара. Охлаждение воздуха в рабочей зоне в этом

случае будет способствовать снижению температуры пласта, т.е. оба процесса будут противодействовать друг другу.

Ввиду того что воздух по сути является теплоизолятором, на его охлаждение требуются значительные затраты электроэнергии при работе СКВ. А в исследованиях [330–332] описаны помещения для профилактики тепловых поражений горнорабочих, в которых установлены кондиционеры для возможности охладиться рабочим. Для того чтобы не расходовать колоссальное количество электроэнергии на работу СКВ в глубоких шахтах и рудниках, учитывая, что их функционирование зачастую не позволяют снизить температуру в рабочей зоне до требуемой, установка в области ведения горных работ подобных помещений позволит решить проблему обеспечения комфортных условий труда.

Еще более рациональным процесс нормализации условий работы горнорабочих можно сделать, если их производственная деятельность проводится в машинах (комбайнах, самоходных вагонах и т.д.). В этом случае необходимо нормализовать микроклимат в самих этих машинах, установив на них закрытую теплоизоляционную кабину с кондиционером.

Как известно, повышение температуры воздуха влияет не только на работоспособность людей, но и может вывести из строя действующее в руднике (шахте) оборудование. В связи с этим в помещениях для охлаждения людей можно предусмотреть боксы для охлаждения действующего оборудования. В этом случае затраты на работу СКВ будут значительно снижены.

В случае, если упомянутые решения будут неэффективны, можно использовать СКВ для локального охлаждения участка. При этом используемое оборудование должно иметь высокий КПД и работать по способу, предусматривающему «сброс» нагретого в СКВ воздуха на исходящую струю, по аналогии с СКВ, приведенной в п. 6.1.1.

6.2. Расчет технологических параметров предлагаемой системы кондиционирования воздуха в неглубоких рудниках и шахтах

Охлаждающую систему в подземно-поверхностной СКВ предлагается выполнять на базе парокомпрессорных холодильных установок, являющихся наиболее эффективными в своем классе [184, 181].

Охлаждаемый воздух поступает в испаритель СКВ (рисунок 6.4), хладопроизводительностью СКВ можно управлять как за счет охлаждающего воздуха, поступающего в конденсатор СКВ, так и за счет расхода хладагента.

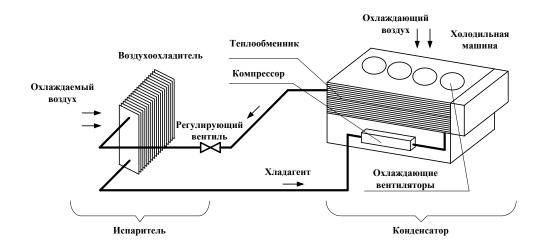


Рисунок 6.4 – Структурная схема парокомпрессорной холодильной установки

6.2.1. Расчет требуемой хладопроизводительности системы кондиционирования воздуха и эффективной ее работы

Для выбора параметров установки можно воспользоваться методом определения требуемой хладопроизводительности, при котором требуемые параметры воздуха на выходе из СКВ определяются по значению его удельной энтальпии $I_{\text{СКВ}}$. Для этого согласно [258, 333, 334] решаются два уравнения теплового баланса

$$\begin{cases} G_{\text{возд}} \cdot I_{\text{возд}} = G_{\text{СКВ}} \cdot I_{\text{СКВ}} + G_{\text{ск.o}} \cdot I_{\text{нар}} \\ G_{\text{возд}} \cdot d_{\text{возд}} = G_{\text{СКВ}} \cdot d_{\text{СКВ}} + G_{\text{ск.o}} \cdot d_{\text{нар}} \end{cases}, \tag{6.13}$$

где I_i — удельная энтальпия воздуха при заданной температуре и влагосодержании, кДж/кг; $G_{\text{возд}}$, $G_{\text{СКВ}}$, $G_{\text{ск.o}}$ — массовый расход воздуха, соответственно поступающего в воздухоподающий ствол, проходящего через СКВ и скиповые окна, кг/с; d_i — влагосодержание воздуха, г/кг; Q_i — объемный расход поступающего воздуха, м³/с; ρ_i — плотность воздуха, кг/м³.

Удельные энтальпии потоков воздуха температурой ($T_{\text{возд,1}}$) и влагосодержанием ($d_{\text{возд,1}}$), поступающего в воздухоподающий ствол № 1 ($I_{\text{возд}}$) и проходящего через скиповые окна ($I_{\text{нар}}$), согласно [328] определяются по формулам:

$$I_{\text{возд,1}} = 1,005 \cdot T_{\text{возд,1}} + \left(2500 + 1,8 \cdot T_{\text{возд,1}}\right) \cdot \frac{d_{\text{возд,1}}}{1000}; \tag{6.14}$$

$$I_{\text{hap}} = 1,005 \cdot T_{\text{hap}} + (2500 + 1,8 \cdot T_{\text{hap}}) \cdot \frac{d_{\text{hap}}}{1000}.$$
 (6.15)

Тогда удельная энтальпия воздуха, выходящего из испарителя поверхностной СКВ, равна

$$I_{\text{CKB},\text{пов}} = \frac{G_{\text{возд,1}} \cdot I_{\text{возд,1}} - G_{\text{ск.o}} \cdot I_{\text{нар}}}{G_{\text{CKB},\text{пов}}},$$
(6.16)

а влагосодержание

$$d_{\text{CKB},\text{пов}} = \frac{G_{\text{возд,1}} \cdot d_{\text{возд,1}} - G_{\text{ск.o}} \cdot d_{\text{нар}}}{G_{\text{CKB},\text{пов}}}.$$
(6.17)

В этом случае значение требуемой температуры воздуха на выходе из испарителя поверхностной СКВ определится как

$$T_{\text{CKB,IIOB}} = \frac{\left(I_{\text{CKB,IIOB}} - \frac{2500 \cdot d_{\text{CKB,IIOB}}}{1000}\right)}{\left(1,005 + \frac{1,8 \cdot d_{\text{CKB,IIOB}}}{1000}\right)}, {}^{0}\text{C}.$$
(6.18)

Аналогичным образом производится расчет для испарителя подземной СКВ в воздухоподающем стволе № 2.

Удельная энтальпия воздуха, выходящего из испарителя подземной СКВ, равна

$$I_{\text{СКВ, подз}} = \frac{G_{\text{возд, 1}} \cdot I'_{\text{возд, 1}} - G_{\text{возд, 2}} \cdot I'_{\text{нар}}}{G_{\text{p}}},$$
 (6.19)

где G_p — массовый расход воздуха, поступающего в подземную часть рудника, кг/с; $I'_{\text{возд,1}}$ и $I'_{\text{нар}}$ — удельные энтальпии воздуха, изменяющиеся за счет повышения температуры под действием возрастающего барометрического давления соответственно в воздухоподающих стволах № 1 и 2, кДж/кг.

Температура воздуха, изменяющаяся под действием возрастающего барометрического давления в воздухоподающих стволах согласно [13] вычисляется по формуле

$$T_{\text{O.Д.},i} = a_1 p_{\text{a}}^{n_1} + a_2 T_{\text{нач}}^{n_2} + a_3 H_{\text{возд},i}^{n_3} + a_4 D_{\text{возд},i}^{n_4} + a_5 Q_{\text{возд},i}^{n_5}, \tag{6.20}$$

где a_i , n_i — соответственно коэффициенты регрессии и степени при параметре, зависящие от назначения ствола (скиповой, клетевой или скипоклетевой) [13]; p_a — атмосферное давление воздуха, мм рт. ст.; $T_{\text{нач}}$ — температура воздуха, поступающего в воздухоподающий ствол, 0 С; H_i , D_i и Q_i — соответственно глубина (м), диаметр (м) i-го воздухоподающего ствола и объемный расход воздуха, проходящего через него (м 3 /с).

В связи с тем что нагрев воздуха происходит при неизменном влагосодержании, значение этого параметра на выходе из подземной СКВ определяется по формуле

$$d_{\text{CKB},\text{подз}} = \frac{G_{\text{возд,1}} \cdot d_{\text{возд,1}} - G_{\text{возд,2}} \cdot d_{\text{нар}}}{G_{\text{p}}}, \tag{6.21}$$

а удельные энтальпии воздуха $I'_{\text{возд,1}}$ и $I'_{\text{нар}}$ – по формулам (6.14) и (6.15), где вместо $t_{\text{возд,1}}$ и $t_{\text{нар}}$ подставляются значения $t_{\text{о.д.,}i}$, полученные по формуле (6.20).

Тогда температура воздуха на выходе из подземной СКВ рассчитывается как

$$t_{\text{CKB,подз}} = \frac{\left(I_{\text{CKB,подз}} - \frac{2500 \cdot d_{\text{CKB,подз}}}{1000}\right)}{\left(1,005 + \frac{1,8 \cdot d_{\text{CKB,подз}}}{1000}\right)}, {}^{0}\text{C}.$$
(6.22)

6.2.2. Расчет характеристик оборудования системы кондиционирования воздуха для обеспечения требуемой хладороизводительности при минимальных затратах энергоресурсов

При применении парокомпрессорной холодильной установки для поддержания требуемых параметров определяются значения температуры (t_i) , давления (P_i) и удельной энтальпии (I_i) хладагента во всех переходных точках холодильной установки по тепловой диаграмме: испаритель выход T_1 , конденсатор вход T_2 , конденсатор выход T_3 , испаритель вход T_4 .

Расчетная хладопроизводительность конденсатора согласно [335] выбирается по расчетным параметрам компрессора, для чего необходимо выполнить вычисления, которые приводятся ниже.

Индикаторный КПД компрессора (т.е. отношение внутренней удельной работы идеального компрессора на единицу расхода хладагента к внутренней удельной работе действительного компрессора) согласно [335] определяется по формуле

$$\eta_{\kappa} = \frac{T_1}{T_2} + b \cdot T_1, \tag{6.23}$$

где b — коэффициент, учитывающий расположение компрессора (для горизонтальных компрессоров примерно равен 0,002).

Удельная внутренняя работа компрессора (кДж/кг) определяется по формуле

$$l_{\rm B} = \frac{I_2 - I_1}{\eta_{\rm K}},\tag{6.24}$$

где I_1 и I_2 – удельные энтальпии, соответствующие температурам хладоносителя T_1 и T_2 .

Удельный подвод тепла в испарителе:

$$q_0 = I_1 - I_4. (6.25)$$

Удельный отвод тепла в конденсаторе:

$$q_{\text{\tiny KOH}} = I_2 - I_3. \tag{6.26}$$

Баланс тепла (кДж/кг) согласно [335] определяется по формуле

$$q = l_{\rm B} + q_0. {(6.27)}$$

Отсюда требуемая хладопроизводительность установки (кВт) равна:

$$q_1 = G_{XH} \cdot q \,. \tag{6.28}$$

где $G_{\rm xh}$ — массовый расход хладоносителя, кг/с.

По полученному значению требуемой хладопроизводительности ($q_{\text{СКВ}}$ и q_1) выбирается наиболее близкий вариант холодильной машины. В дальнейших расчетах принимаются значения данного оборудования (из технической документации).

В зависимости от количества тепла, выделяемого при работе конденсатора ($q_{\text{кон}}$), и массового расхода воздуха охлаждающих вентиляторов ($G_{\text{ов}}$) по формуле [335] определяется температура воздуха, поступающего в исходящую по вентиляционному стволу струю воздуха:

$$T_{\text{\tiny MCX}} = \frac{q_{\text{\tiny KOH}} \cdot 10^3 - 3600 \cdot G_{\text{\tiny OB}} \cdot c_p \cdot T_{\text{\tiny BX}}}{3600 \cdot G_{\text{\tiny OB}} \cdot c_p}, \tag{6.29}$$

где $T_{\rm Bx}$ — температура воздуха, поступающего в конденсатор СКВ через охлаждающие вентиляторы, °С (см. рисунок 6.4).

Следует отметить, что значение $q_{\text{кон}}$ в формуле (6.29) имеет единицы измерения – ккал/ч.

С учетом того что температура воздуха, поступающего через охлаждающие вентиляторы, при расположении конденсатора СКВ в главных вентиляционных выработках будет значительно ниже температуры наружного воздуха, КПД работы СКВ будет увеличиваться. С возрастанием разности между этими значениями будет увеличиваться КПД всей установки.

Регулирование режима работы ГВУ с учетом действия возникающей при кондиционировании положительной общерудничной естественной тяги позволит снизить ее энергопотребление. Например, для рудника БКПРУ-2 (ОАО «Уралкалий») согласно [336] затраты электроэнергии при применении предлагаемой по сравнению с поверхностной СКВ снизятся на

312,4 кВт·ч, что соответствует примерно 12 % всей электроэнергии, затрачиваемой на проветривание. В результате этого повышается энергоэффективность проветривания и воздухоподготовки при исключении (значительном снижении) выпадения влаги в руднике и всех связанных с этим процессом негативных явлений.

6.2.3. Применение шахтных калориферных установок в теплое время года для кондиционирования воздуха

Ввиду того что при использовании СКВ изменяется температура воздуха, меняется и значение естественных тяг (в этом случае можно сказать – тепловых депрессий), возникающих как между шахтными стволами, так и между подземными горными выработками, в которых осуществляется воздухоподготовка. Поэтому при осуществлении охлаждения и осушения воздуха необходимо прогнозировать воздухораспределение между горными выработками и управлять этим процессом с учетом его инерционности. В этом случае различия между управлением процессом воздухоподготовки в холодное и теплое время года не будет. Однако требуется разработать систему и технологические решения, при которых этот процесс будет максимально эффективным, и на него будет расходоваться меньшее количество энергоресурсов.

Предложенная в п. 3.2.1 конструкция ШКУ (см. рисунок 3.4) предполагает ее использование не только для нагрева воздуха в холодное время года, но и для его кондиционирования. Отличие заключается в том, что пластины в ШКУ будут размещены горизонтально.

Переключение ШКУ из режима нагрева в режим охлаждения воздуха и обратно будет осуществляться в автоматизированном режиме в зависимости от температуры наружного воздуха.

Теплоноситель при этом в холодное время года будет поступать с котельной установки, а в теплое время года из системы охлаждения теплоносителя (рисунок 6.5).

Система изменяет количество теплообменников, находящихся одновременно в работе, за счет включения/выключения управляемых задвижек, а также за счет изменения производительности питательных насосов, регулирующих расход теплоносителя.

Таким же образом может использоваться ранее предложенная ШКУ, теплообменники которой располагаются по периметру надшахтного здания (см. рисунок 3.12).

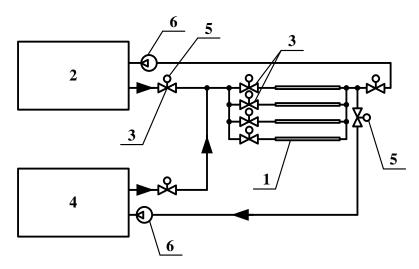


Рисунок 6.5 — Схема подачи теплоносителя в водяную ШКУ: 1 — пластинчатый элемент; 2 — котельная установка; 3 — управляемые задвижки; 4 — система охлаждения хладоносителя; 5 — устройство управления приводами задвижек; 6 — питательные насосы

При расчете параметров СКВ необходимо учитывать степень осушения воздуха при его охлаждении, так как процесс охлаждения воздуха происходит с изменением его влагосодержания. Охлаждаемый воздух можно довести до состояния насыщения на теплообменниках. Это произойдет тогда, когда температура воздуха будет равна температуре насыщения («точка росы»). Если понижать температуру ниже «точки росы» при постоянном атмосферном давлении, то начинается конденсация водяного пара.

На рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей температура воздуха в выработках ≈ 8°С. Критическая «точка росы» вблизи солевых поверхностей при данной температуре согласно [337] составляет 77–80 % относительной влажности φ. Поэтому требуемая относительная влажность воздуха на выходе из теплообменников должна быть меньше 77 %.

Для расчета параметров воздухоохладительной установки необходимо задать максимальное значение относительной влажности наружного воздуха (100 %).

При расчетах следует учитывать, что унос капель из СКВ не наблюдается при массовой скорости воздуха не больше $(\nu\rho)_{\phi} = 5 \div 6$ кг/(м²·с) [333]. Следовательно, выбор количества вентиляционных окон будет зависеть от средней скорости и плотности воздуха в них.

На основании расчетов СКВ и ШКУ выбираются параметры установки по формулам, приведенным в работах [257, 258, 338]. Подробный расчет аэродинамического сопротивления теплообменников всех типов приведен в работе [339].

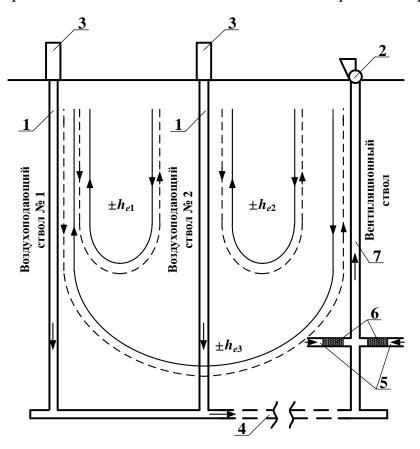


Рисунок 6.6 — Упрощенная схема проветривания при использовании электронагревательных пластин в исходящих горных выработках: I — воздухоподающий ствол; 2 — ГВУ; 3 — поверхностный комплекс воздухоподающего ствола; 4 — подземная часть горнодобывающего предприятия; 5 — главные вентиляционные (исходящие) горные выработки; 6 — электронагревательные пластинчатые элементы; 7 — вентиляционный ствол

Таким образом, шахтные калориферные установки, расположенные в калориферном канале и по периметру надшахтного здания, также можно использовать для охлаждения и осущения воздуха в теплое время года.

Кроме того, для увеличения величины положительной общерудничной естественной тяги при работе СКВ, т.е. для снижения электроэнергии, затрачиваемой на работу ГВУ, в исходящих горных выработках могут быть установлены электронагревательные пластины [340] (рисунок 6.6).

Приведенная система может работать не только в теплое время года, а круглогодично.

Логичным является вопрос о том, насколько затраты на электронагревательные пластины будут соизмеримы с возникающей при этом процессе общерудничной естественной тягой.

Моделирование воздухораспределения для условного калийного рудника глубиной 400 м, диаметром стволов 7 м при атмосферных параметрах воздуха 20 °C, атмосферном давлении 740 мм рт. ст. и затратах электроэнергии на работу электронагревательных пластин всего 22 кВт·ч показало, что при использовании заявляемого способа проветривания экономия электроэнергии за счет снижения производительности ГВУ составила 231,52 кВт·ч. В этом случае затраты на работу пластин примерно в 10,5 раза меньше, чем сэкономленная на работу ГВУ электроэнергия [340].

6.3. Исследование и разработка способа обеспечения безопасных и комфортных условий работы в нефтешахтах

Для решения проблемы повышенной температуры воздуха в рабочей зоне (буровой галерее) нефтяной шахты можно было бы воспользоваться предложением, представленным в п. 6.1.2, т.е. разместить в горных выработках помещения для тепловой разгрузки горнорабочих, если бы все горные выработки в ней имели высокую температуру. Разогреты горные выработки в нефтешахте только в буровой галерее, и после добычи нефти в ней («продувка» скважин) горнорабочие покидают зону повышенной температуры.

Второе видимое решение этой проблемы — автоматизация процесса добычи нефти. Однако ввиду высокой загрязненности нефти и непредсказуемости изменения давления пара в скважинах и пласте, в настоящее время процесс добычи нефти термошахтным способом автоматизировать не удается.

Следовательно, для обеспечения безопасных условий труда горнорабочих в нефтешахтах в настоящее время необходимо решить две задачи:

- 1. Иногда температура воздуха в буровой галерее достигает значений, опасных для человека (70°С и выше [174]), и даже незначительное по времени пребывание в буровой галерее может повлечь за собой опасность для здоровья и жизни горнорабочих. Поэтому необходимо снизить температуру воздуха в буровой галерее, но выполнить это таким образом, чтобы не повлиять на эффективность добычи нефти (не охлаждать нефтяной пласт).
- 2. Не допустить выхода нагретого воздуха из буровой галереи в горные выработки.

6.3.1. Способ обособленного проветривания уклонного блока нефтяной шахты

Проведенный анализ (см. п. 1.5.2) показал, что в настоящее время отсутствуют решения, позволяющие одновременно охлаждать воздух в буровой галерее уклонного блока нефтешахты для нормализации санитарно-гигиенических условий труда горнорабочих при обеспечении энерго- и ресурсосбережения.

Способ проветривания, применяемый в настоящее время, когда охлажденный воздух подается через скважину с поверхности в уклонный блок, можно модернизировать следующим образом.

Поступающий из выработок главных направлений по ходку в буровую галерею воздух имеет температуру 8–10 °C, т.е. он является достаточно охлажденным. Нагревается воздух уже в буровой галерее. И далее нагретый воздух, двигаясь по исходящим горным выработкам, нарушает в них санитарногигиенические условия труда.

Поэтому необходимо нагретый в буровой галерее воздух выводить через вентиляционную скважину на поверхность (рисунок 6.7) [341].

С целью предотвращения поступления нагретого воздуха в исходящие выработки в уклоне после места нахождения вентиляционной скважины устанавливается воздушный тамбур. В этом случае весь нагретый воздух будет удаляться на поверхность.

В связи с тем что исходящие выработки необходимо проветривать, часть поступающего в уклонный блок воздуха при помощи ВМП отправляется в неизолированную часть уклона (см. рисунок 6.7).

Учитывая тот факт, что горнорабочие присутствуют в буровой галерее непродолжительное время (только для «продувки» добывающих скважин) и после этого убывают в участок, где температура воздуха соответствует нормам, можно СКВ в добычном участке не применять.

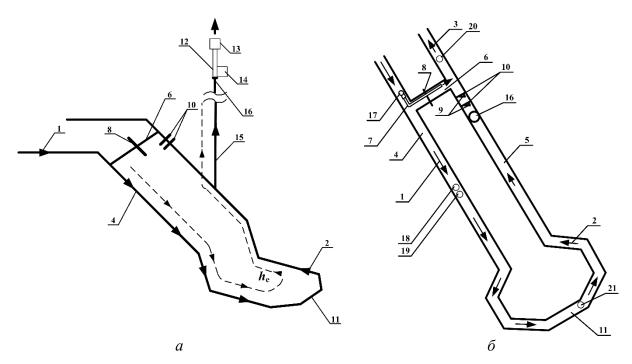


Рисунок 6.7 — Предлагаемая схема раздельного способа проветривания уклонного блока нефтешахты: a — вид сверху; δ — вид сбоку; I — свежий воздух; 2 — нагретый воздух; 3 — исходящий поток воздуха; 4 — ходок; 5 — уклон; δ — соединительная выработка; 7 — воздуховод в соединительной выработке; 8 — глухая перемычка; 9 — двери; 10 — перемычка воздушного тамбура; 11 — буровая галерея; 12 — вентиляционная труба; 13 — дефлектор; 14 — поверхностный вентилятор; 15 — вентиляционная скважина; 16 — устье вентиляционной скважины; 17 — вентилятор местного проветривания; 18 — датчик расхода воздуха; 19 — датчик температуры и давления или плотномер; 20 — дополнительный датчик расхода воздуха; 21 — дополнительный датчик температуры и давления или плотномер

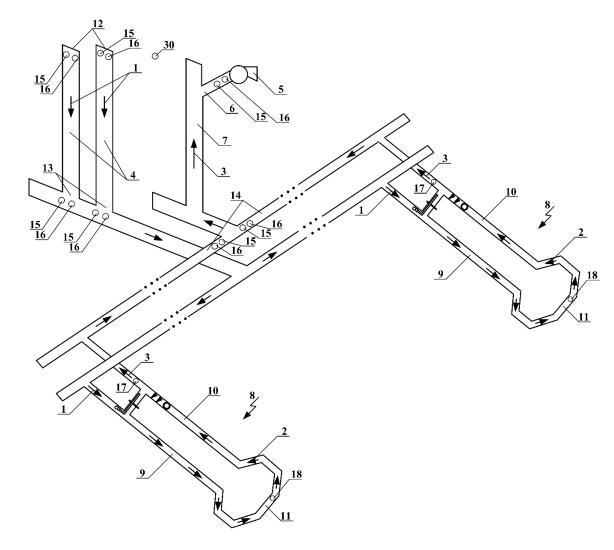


Рисунок 6.8 — Способ раздельного проветривания уклонных блоков и нефтешахты в целом: 1 — свежий воздух; 2 — нагретый воздух; 3 — исходящий поток воздуха; 4 — воздухоподающий ствол; 5 — ГВУ; 6 — канал ГВУ; 7 — вентиляционный ствол нефтешахты; 8 — уклонный блок; 9 — ходок; 10 — уклон; 11 — буровая галерея; 12 — устье воздухоподающего ствола; 13 — околоствольный двор воздухоподающего ствола; 14 — главная исходящая вентиляционная выработка; 15 — датчик расхода воздуха; 16 — датчик температуры и давления или плотномер; 17 — дополнительный датчик расхода воздуха; 18 — дополнительный датчик температуры и давления или плотномер

Процесс проветривания уклонных блоков нефтешахты должен контролироваться датчиками таким образом, чтобы в буровую галерею и исходящие горные выработки поступал требуемый объем воздуха, т.е. при помощи системы автоматизации, контролирующей режим работы ГВУ, ВМП во всех добычных участках с учетом изменяющейся естественной тяги в между выработками и шахтными стволами (рисунок 6.8).

В этом случае выдаче воздуха на поверхность будет способствовать естественная тяга, возникающая в уклонном блоке, которая будет тем больше, чем выше температура исходящего воздуха.

6.3.2. Система охлаждения и утилизации тепла исходящего из буровой галереи нефтяной шахты воздуха

Нефтяные шахты, помимо основных параметров (количество добычных участков, глубины залегания полезного ископаемого и т.д.), отличаются по температуре воздуха в буровой галерее. В некоторых случаях, как было указано ранее, температура в ней может достигать 70 °С и выше. В таких условиях можно использовать СКВ, но располагать ее не на поверхности, а на входе в уклонный блок (в ходке) [342]. Конденсатор СКВ при этом предлагается разместить в устье вентиляционной скважины (рисунок 6.9).

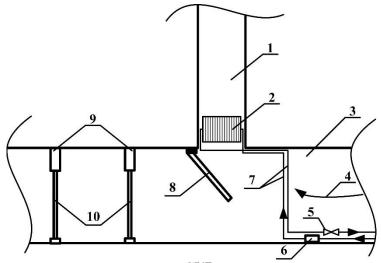


Рисунок 6.9 — Размещение конденсатора СКВ на входе в вентиляционную скважину уклонного блока нефтешахты: 1 — вентиляционная скважина; 2 — конденсатор СКВ; 3 — уклон; 4 — нагретый воздух; 5 — дроссель СКВ; 6 — компрессор СКВ; 7 — трубопровод с хладагентом; 8 — направляющая; 9 — воздушный тамбур из перемычек; 10 — двери в перемычках воздушного тамбура

При подобном варианте, помимо нагретого в буровой галерее воздуха, в вентиляционную скважину будет «сбрасываться» воздух, нагретый в конденсаторе СКВ, в результате чего увеличивается естественная тяга, способствующая выдаче воздуха из уклонного блока.

Кроме того, в описанном способе на выходе из вентиляционной скважины предложено устанавливать тепловой насос, предназначенный для утилизации тепловой энергии нагретого воздуха (рис. 6.10).

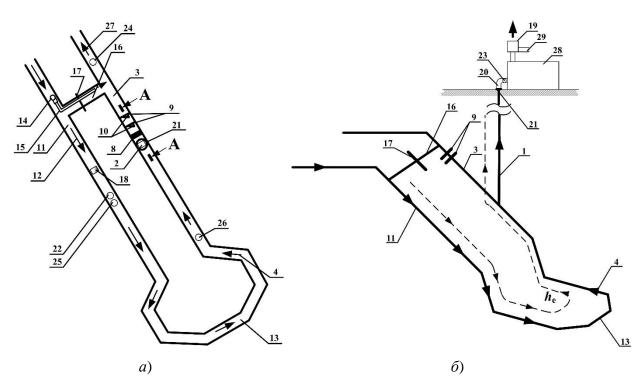


Рисунок 6.10 — Предлагаемая схема раздельного способа проветривания уклонного блока нефтешахты: a — вид сверху; δ — вид сбоку; I — вентиляционная скважина; 2 — конденсатор СКВ; 3 — уклон; 4 — нагретый воздух; 8 — направляющая; 9 — воздушный тамбур из перемычек; 10 — двери в перемычке воздушного тамбура; 11 — ходок; 12 — свежий воздух, поступающий в ходок 11; 13 — буровая галерея; 14 — вентилятор местного проветривания; 15 — воздуховод; 16 — соединительная выработка; 17 — глухая перемычка; 18 — испаритель СКВ; 19 — дефлектор; 20 — вентиляционная труба; 21 — устье вентиляционной скважины; 22 — датчик расхода воздуха в ходке; 23 — датчик расхода воздуха в вентиляционной трубе; 24 — датчик расхода воздуха на выходе из уклонного блока; 25 — датчик температуры и давления или плотномер; 26 — датчик температуры и давления или плотномер на выходе из буровой галереи; 27 — исходящий из уклонного блока поток воздуха; 28 — испаритель теплового насоса; 29 — поверхностный вентилятор

Таким образом, предложенная система по сравнению с существующими и предлагаемыми позволит осуществить охлаждение воздуха, поступающего в бу-

ровую галерею уклонного блока, круглогодично, без применения энергозатратного процесса дополнительной воздухоподготовки в холодное время года. Расположение конденсатора СКВ на входе в вентиляционную скважину позволит усилить действие естественной тяги (тепловой депрессии) $h_{\rm e}$, способствующей поступлению воздуха в уклонный блок. В этом случае потребуются меньшие затраты электроэнергии на проветривание (на работу ГВУ и поверхностного вентилятора). В ходе предварительных расчетов установлено, что за счет естественной тяги могут быть снижены затраты электроэнергии на проветривание уклонного блока в пределах 17–23 %, в результате чего повысится энергоэффективность процесса добычи нефти термошахтным способом [342]. При этом в рабочей зоне нормализуются санитарно-гигиенические условия труда.

Кроме того, тепло исходящего по вентиляционной скважине воздуха будет утилизироваться в тепловом насосе. В результате чего, также будет практически бесплатно получена дополнительная энергия, а также снижен вред окружающей среде.

6.3.3. Способ автоматизированной подачи воздуха в уклонный блок нефтяной шахты, перед проходом в него горнорабочих

Ввиду того что в буровой галерее горнорабочие присутствуют редко, в основном для продувки добывающих скважин, можно наладить процесс подачи воздуха в буровую галерею и нормализации санитарно-гигиенических условий труда в ней и исходящих горных выработках путем подачи воздуха (в том числе охлажденного) только в период присутствия людей в рабочей зоне [343].

В этом случае предлагается воздух в буровую галерею подавать только в случае нахождения в ней горнорабочих, а для проветривания исходящих горных выработок применить уже описанную схему разделения потоков воздуха в ходке уклонного блока при помощи ВМП (рисунок 6.11).

Система проветривания будет работать в автоматизированном режиме.

Когда в уклонном блоке отсутствуют горнорабочие, режим работы ГВУ можно перевести на пониженную производительность, сэкономив тем самым значительный объем электроэнергии.

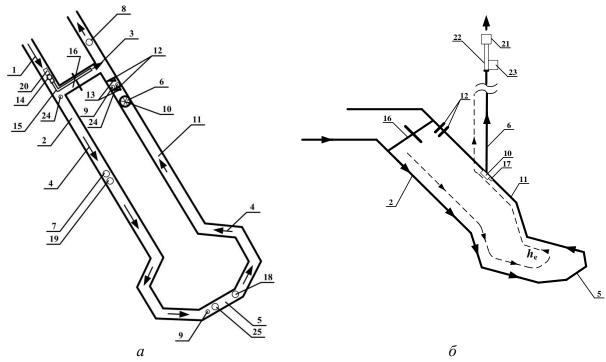


Рисунок 6.11 — Упрощенная схема предлагаемого способа проветривания уклонного блока нефтешахты: a — вид сверху; δ — вид сбоку; I — свежий воздух; 2 — воздухоподающая выработка уклонного блока; 3 — часть воздуха, поступающего в исходящие вентиляционные выработки; 4 — часть воздуха, поступающего по воздухоподающей выработке; 5 — буровая галерея; 6 — вентиляционная скважина; 7, 8 — датчики расхода воздуха; 9 — прибор контроля присутствия/отсутствия горнорабочих; 10 — регулируемый запорный элемент; 11 — воздуховыдающая выработка уклонного блока; 12 — воздушный тамбур; 13 — двери воздушного тамбура; 14 — вентилятор местного проветривания; 15 — воздуховод; 16 — соединительная выработка; 17 — блок управления запорным элементом; 18, 19 — датчики температуры и давления или плотномеры; 20 — блок управления вентилятором местного проветривания; 21 — дефлектор; 22 — вентиляционная труба; 23 — поверхностный вентилятор; 24 — устройство визуализированного оповещения о возможности прохода в буровую галерею; 25 — сигнализатор газов

Выдача воздуха из буровой галереи предусматривается по вентиляционной скважине за счет работы поверхностного вентилятора (рисунок 6.11). Поступлению воздуха на поверхность будет способствовать естественная тяга (тепловая депрессия) $h_{\rm e}$, возникающая вследствие разности плотностей (температуры и давления) воздуха в буровой галерее и на поверхности. При высокой температуре воздуха в буровой галерее проветривание может осуществляться только за счет естественной тяги $h_{\rm e}$, усиливаемой дефлектором (при

наличии ветра), расположенном на вентиляционной трубе. В этом случае поверхностный вентилятор необходимо включать только в случае, если проветривание за счет естественной тяги невозможно.

В период отсутствия горнорабочих в буровой галерее для прекращения подачи воздуха устье вентиляционной скважины перекрывается запорным элементом, который может быть выполнен, например, в виде сужающей сечение диафрагмы (рисунок 6.12).

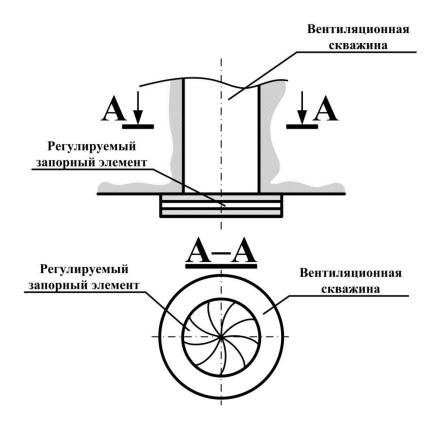


Рисунок 6.12 — Один из вариантов устройства, изменяющего сечение воздухоподающей скважины в уклонном блоке нефтешахты (в виде диафрагмы)

Для предотвращения поступления нагретого воздуха в исходящие горные выработки в воздуховыдающей выработке установлен воздушный тамбур из перемычек с дверями (см. рисунок 6.11).

При снижении требуемого объемного расхода воздуха, поступающего в уклонные блоки, режим работы ГВУ системой автоматизации будет переведен на пониженную подачу. В этом случае можно добиться снижения электроэнергии, расходуемой на проветривание, при обеспечении нефтешахты требуемым количеством воздуха.

6.3.4. Система обеспечения безопасных условий труда в нефтяных иахтах, работающая по принципу «бережливого производства»

С целью обеспечения требуемых санитарно-гигиенических условий труда в рабочей зоне (буровой галерее уклонного блока) в рассматриваемом способе предполагается использование СКВ. Однако ввиду того что СКВ состоит из испарителя, в котором поступающий воздух охлаждается, и конденсатора, в котором происходит охлаждение хладоносителя, в результате чего на его выходе образуется поток нагретого воздуха, для повышения эффективности воздухоподготовки предлагается разделить образующиеся потоки [344]. С этой целью участок разогретого пласта в уклонном блоке разбивается при помощи теплоизоляционной перегородки (рисунок 6.13). При этом теплоизоляционная перегородка не позволяет нагретому воздуху попадать в буровую галерею и исходящие горные выработки. Весь нагретый воздух удаляется по вентиляционной скважине на поверхность (рисунок 6.14) за счет действия естественной тяги.

С целью снижения объемного расхода воздуха, удаляемого по вентиляционной скважине на поверхность (не участвующего в проветривании рабочей зоны), между горной выработкой и теплоизоляционной перегородкой предусмотрена управляемая в автоматизированном режиме шлюзовая заслонка. Возникающая в этом случае естественная тяга способствует поступлению воздуха в уклонный блок, но за счет заслонки основная его часть поступает через испаритель СКВ в буровую галерею.

В способе может быть использована еще одна СКВ, которая будет охлаждать воздух непосредственно в буровой галерее (позиция *16* на рисунке 6.13). Конденсатор указанной СКВ в этом случае будет располагаться в устье вентиляционной скважины (рисунке 6.14). При «сбросе» теплого воздуха из него

естественная тяга будет усиливаться, а следовательно, будет увеличиваться объемный расход свежего воздуха, поступающего в уклонный блок.

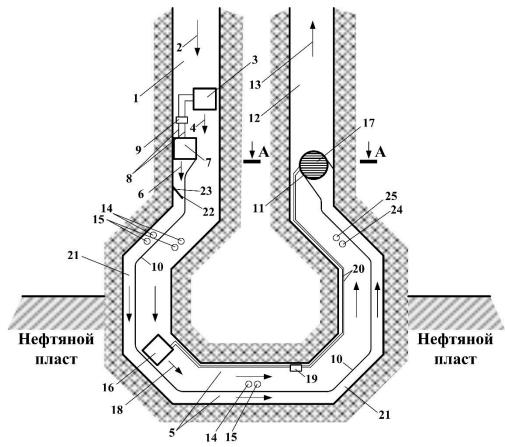


Рисунок 6.13 – Предлагаемый способ проветривания уклонного блока нефтешахты (вид сверху): 1 – воздухоподающая выработка уклонного блока; 2 – свежий воздух; 3 – испаритель первой системы кондиционирования воздуха; 4 – охлажденный воздух; 5 – буровая галерея; 6 – нагретый воздух; 7 – конденсатор первой системы кондиционирования воздуха; 8 – трубопровод с хладоносителем; 9 – регулирующее устройство в трубопроводе 8; 10 — теплоизоляционная перегородка; 11 — вентиляционная скважина; 12 — воздуховыдающая выработка; 13 – исходящий воздух; 14 – датчик температуры воздуха, установленный в воздухоподающей выработке; 15 – датчик расхода воздуха, установленный в воздухоподающей выработке; 16 – испаритель второй системы кондиционирования воздуха; 17 – конденсатор второй системы кондиционирования воздуха; 18 – охлажденный в испарителе 16 воздух; 19 – регулирующее устройство в трубопроводе с хладоносителем 20; 20 – трубопровод с хладоносителем; 21 – участок между нефтяным пластом и теплоизолирующей перегородкой 10; 22 — управляемая шлюзовая заслонка; 23 — устройство управления заслонкой 22; 24 – датчик температуры воздуха, установленный в воздуховыдающей выработке; 25 – датчик расхода

воздуха, установленный в воздуховыдающей выработке

Ввиду того что 60–70 % от всего тепла, выделяющегося в буровой галерее, происходит через добывающие скважины [345, 346], их необходимо размещать за теплоизоляционной перегородкой, а после сбора разогретую

нефтяную смесь необходимо отправлять по теплоизоляционному трубопроводу. Для этой цели может быть использован разработанный как раз для условий нефтешахты трубопровод [347], конструкция которого приведена на рисунке 6.15.

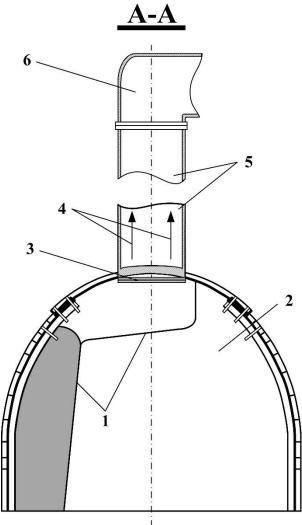


Рисунок 6.14 — Предлагаемый способ проветривания уклонного блока нефтешахты (разрез по вентиляционной скважине): I — теплоизоляционная перегородка; 2 — воздуховыдающая выработка; 3 — конденсатор второй системы кондиционирования воздуха; 4 — нагретый воздух; 5 — вентиляционная скважина; I — воздухоподающая выработка уклонного блока:

2 — свежий воздух; 3 — испаритель первой системы кондиционирования воздуха; 4 — охлажденный воздух; 5 — буровая галерея; 6 — вентиляционная труба

За счет того, что в качестве внутреннего контура трубопровода используется многогранник, уменьшается поверхность, контактируемая с внешним снимаемым контуром. Воздух между внешним и внутренним контурами играет роль теплоизолятора. За счет формы внутреннего контура в нижней его

части будет скапливаться осадок, а за счет его прозрачности (например, в случае выполнения из оргстекла) можно контролировать степень загрязнения трубопровода. Визуально наблюдать за внутренним контуром можно при полном или частичном разборе внешнего контура трубопровода. Ввиду того что скорость потока в трубопроводе не играет существенной роли, гидродинамические свойства внутреннего контура трубопровода также не имеют существенного значения. В этом случае увеличение гидродинамического сопротивления трубопровода за счет применения вместо трубы многогранника не повлияет на эффективность транспортировки нефти.

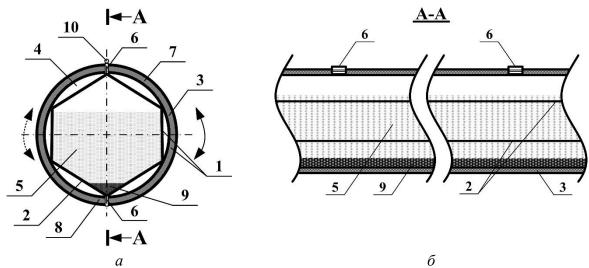


Рисунок 6.15 — Теплоизоляционный трубопровод для транспортировки нагретой загрязненной нефти (a — фронтальный разрез; δ — продольный разрез): I — трубопровод; 2 — внутренний контур трубопровода I; 3 — внешний контур трубопровода I; 4 — воздушный теплоизоляционный слой; 5 — транспортируемая жидкость; δ — устройство для открытия/ снятия внешнего контура 3; 7 — правая часть внешнего контура 3; 8 — левая часть внешнего контура 3; 9 — осадок; 10 — кольцо для подвеса

В предложенном способе нефтяной пласт помимо нагрева от перегретого пара будет нагреваться теплым воздухом, исходящим из конденсатора СКВ (как минимум не будет охлаждаться подаваемым из СКВ холодным воздухом). В этом случае исключается проблема, связанная с охлаждением нефтяного пласта. Весь нагретый воздух через вентиляционную скважину будет удаляться на поверхность. При необходимости тепло исходящего воздуха можно утилизировать в тепловом насосе на дневной поверхности [13].

За счет теплоизолирующей перегородки тепло от выработок буровой галереи не будет поступать в рабочую зону, где воздух будет охлаждаться за счет работы испарителя СКВ. В этом случае в исходящие горные выработки воздух, нагретый от нефтяного пласта, поступать не будет, что позволит обеспечить в них поддержание требуемых санитарно-гигиенических условий труда. Существенные затраты электроэнергии на работу СКВ и на проветривание нефтешахты в целом будут частично или полностью компенсироваться за счет снижения электроэнергии на работу вентиляторов, так как в проветривании будет участвовать естественная тяга, а наличие теплоизоляционной перегородки позволит охлаждать воздух до меньших, чем требуется при ее отсутствии, температур.

6.4. Выводы по разделу

- 1. Разработана система кондиционирования воздуха (СКВ) для неглубоких рудников и шахт, при работе которой образующийся в результате функционирования конденсатора подземной холодильной машины нагретый воздух «сбрасывается» на исходящую из рудника (шахты) струю воздуха. В этом случае между шахтными стволами будет возникать положительная общерудничная естественная тяга. Это позволит снизить затраты электроэнергии на работу ГВУ (до 12%), а следовательно, повысить эффективность воздухоподготовки. Кроме того, при предложенном способе кондиционирования воздуха возможно охлаждать его до температуры горных пород, в результате также повысится эффективность работы СКВ.
- 2. Разработана методика расчета СКВ подземно-поверхностного типа, в которой учтено возникновение эффекта эжекции при работе холодильной машины в подземных горных выработках.
- 3. Предложено на глубоких шахтах и рудниках, в которых из-за высокой температуры горных выработок нарушаются условия труда, вместо дорогосто-

ящей процедуры кондиционирования воздуха применять помещения с кондиционерами для тепловой разгрузки. Затраты на реализацию проекта будут несоизмеримо малы по сравнению с затратами на работу СКВ.

- 4. Предложена методика расчета требуемых параметров СКВ, используемой для охлаждения воздуха на неглубоких рудниках.
- 5. Разработана система перевода работы ШКУ в режим охлаждения воздуха. Подобное решение позволит одинаково эффективно использовать одну и ту же установку для воздухоподготовки как в холодное, так и в теплое время года.
- 6. Разработана система подачи воздуха в уклонный блок нефтешахты, в которой каждая буровая галерея проветривается обособленно, а нагретый в ней воздух выдается через вентиляционную скважину на поверхность. При использовании предлагаемой системы появится возможность избежать попадания нагретого воздуха в горные выработки, обеспечивая в них требуемое значение температуры воздуха при снижении затрат электроэнергии на проветривание порядка 17%.
- 7. Разработана система проветривания уклонного блока нефтешахты, в которой конденсатор СКВ располагается в устье вентиляционной скважины, а испаритель СКВ в воздухоподающей выработке. При использовании предлагаемой системы удаляемый через конденсатор СКВ нагретый воздух будет усиливать естественную тягу, в результате чего снизятся затраты электроэнергии на проветривание (около 23%). Поступающий из испарителя СКВ воздух будет способствовать нормализации условий труда в буровой галерее.
- 8. Предложена автоматизированная система подачи воздуха в буровую галерею только при проходе в нее горнорабочих. В этом случае на проветривание горных выработок, в которых отсутствуют люди, не потребуется использовать дополнительный объем воздуха, что позволит повысить энергоэффективность процесса проветривания.
- 9. Разработана система проветривания добычного участка нефтешахты, при которой горная выработка уклонного блока делится на две части. В одной

части воздух охлаждается, а в другой за счет «сброса» нагретого в конденсаторе СКВ воздуха и теплообмена со стенками разогретого массива — нагревается. Нагретый воздух через вентиляционную скважину удаляется на поверхность, где его тепло утилизируется в тепловом насосе. За счет работы испарителя СКВ в рабочей зоне воздух будет охлажден до требуемой температуры. Предлагаемый способ позволит снизить затраты на проветривание, утилизировать тепло исходящего нагретого воздуха и обеспечить требуемые санитарно-гигиенические условия труда горнорабочих

10. Разработана конструкция трубопровода, позволяющего теплоизолированно осуществлять транспортировку горячей нефти из уклонного блока в сборочный пункт. В этом случае снизятся выбросы тепла в рабочую зону. При этом текучесть нефти снижаться не будет, т.е. будут сохраняться ее свойства, полученные в ходе термошахтного способа добычи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основе выполненных автором исследований разработаны и научно обоснованы технические и технологические решения, обеспечивающие промышленную и пожарную безопасность в нормальном и аварийном режимах проветривания подземных предприятий горнорудной отрасли путем энергоэффективного проветривания и имеющие важное хозяйственное значение для экономики страны.

Основные научные и практические результаты исследований заключаются в следующем:

- 1. Разработана методика определения величины и направления общерудничной естественной тяги по данным измерений только на ГВУ, в которой исключено влияние на результаты инерционности системы проветривания и учтено действие случайных факторов, также позволяющая определить аэродинамическое сопротивление подземного горного предприятия, в результате чего можно заранее с заданной доверительной вероятностью спрогнозировать объемный расход поступающего в воздухоподающие стволы воздуха при известных по метеорологическому прогнозу его параметрах и установить оптимальные с точки зрения безопасности и энергопотребления режимы работы ГВУ и системы воздухоподготовки.
- 2. Методами математического моделирования подтверждено, что при воздухоподготовке из-за инфильтрации холодного наружного воздуха через надшахтное здание и армирования воздухоподающих стволов в них наблюдается неравномерный прогрев воздуха по сечению и глубине, возникают сообщающиеся между собой «потоки» воздуха с различной плотностью, что становится причиной действия в стволах «внутристволовой естественной тяги». Установлено, что изменение температуры воздуха на выходе из ШКУ и регулирование режимов ее работы не может решить проблему равномерности прогрева воздуха в воздухоподающих стволах. Возникающие в этом случае «воздушные пробки» при существующих способах воздухоподготовки преграждают путь движению воздуха

по одному (или нескольким) воздухоподающему стволу и способствуют поступлению по другому (другим) движению в объеме, большем, чем способна нагревать система воздухоподготовки. В результате этого в воздухоподающих стволах нарушается температурный режим и возникает угроза выхода из строя ШКУ.

- 3. Для осуществления воздухоподготовки в режиме равномерного прогрева воздуха по сечению и глубине воздухоподающего ствола, исключающем возникновение «воздушных пробок», а также для снижения при этом затрат энергоресурсов предложены и детально рассмотрены методами компьютерного моделирования следующие технические и технологические решения:
- для увеличения площади поверхности теплообмена выполнять нагревательные элементы в виде пластин, расположенных в калориферном канале по ходу движения воздуха, что исключит необходимость дополнительного места на промплощадке, а нагреваемый ими воздух перемешивать вентилятором, расположенным за пластинами, и нагнетать его в воздухоподающий ствол;
- для сокращения инфильтраций холодного наружного воздуха в воздухоподающем стволе установить выше калориферного канала воздушную завесу, направляющую воздух навстречу подсасываемому через надшахтное здание;
- избавиться в системе воздухоподготовки от калориферного канала, расположив теплообменники по периметру надшахтного здания;
- в осенне-весенний периоды, когда температура воздуха близка к установленным правилами безопасности +2 °C, для исключения «перегрева» воздуха, подаваемого в воздухоподающие стволы, а также с целью сокращения затрат энергетических ресурсов на воздухоподготовку для нагрева теплоносителя, поступающего в ШКУ, использовать низкопотенциальное тепло дымовых газов котельной установки, обязательно присутствующей на подземном горном предприятии.
- 4. С целью повышения эффективности проветривания, энерго- и ресурсо- сбережения процесса проветривания в нормальном режиме работы подземного

горного предприятия, а также для повышения уровня безопасности в случае возникновения нештатной ситуации предложены следующие технические и технологические решения:

- разработаны способы проветривания добычных участков калийных рудников, позволяющие снабжать рабочую зону свежим воздухом в энергосберегающем режиме и при возникновении пожара обеспечить удаление дымовых газов из области ведения горных работ;
- разработана автоматизированная система проветривания, осуществляющая рециркуляцию воздуха в нормальном режиме, на начальном этапе перекрывающая при помощи автоматических вентиляционных дверей, расположенных в выработках главных направлений, путь поступления свежего воздуха в выработанное пространство, начинающее играть роль источника тяги, снижая тем самым время на реверсирование струи воздуха в руднике при возникновении нештатной ситуации;
- разработана конструкция шахтной вентиляционной перемычки, позволяющей быстро и надежно изолировать горный участок от попадания в него «излишков» воздуха (с целью энергосбережения) и дымовых газов (при возникновении пожара);
- предложено установить на вентиляционном стволе электрическую ШКУ
 для возможности осуществления реверса ГВУ в холодное время года.
- 5. Для нормализации условий труда в нефтяных шахтах, а также для предотвращения проблем, связанных с выпадением влаги в неглубоких (особенно соляных) рудниках, предложены следующие технические и технологические решения:
- разработана система кондиционирования воздуха подземно-поверхностного типа для неглубоких рудников и шахт, позволяющая снизить затраты электроэнергии на работу ГВУ, а следовательно, снизить энергоемкость процесса воздухоподготовки;
- разработаны способы проветривания добычных участков нефтешахт, позволяющие нормализовать условия труда горнорабочих.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 07.07.2011 г. № 899. М., 2011.
- 2. Об основах государственной политики Российской Федерации в области промышленной безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу: Указ Президента Российской Федерации от 06.05.2018 г. № 198. М., 2018.
- 3. Павлов, А.Ф. О коренных причинах аварий на угольных шахтах / А.Ф. Павлов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2010. № 2. С. 107–111.
- 4. Комаров, В.Б. Рудничная вентиляция / В.Б. Комаров, Ш.Х. Килькеев. М.: Недра, 1969. 416 с.
- 5. Bruce, W.E. Natural draft: its measurement and modeling in underground mine ventilation systems / W.E. Bruce. US: Dept. of Labor. Mine Safety and Health Administration. 1986. 34 p.
- 6. Linden, P.F. The fluid mechanics of natural ventilation / P.F. Linden // Annual Review of Fluid Mechanics. 1999. Vol. 31. P. 201–238.
- 7. Comprehensive and integrated mine ventilation consultation model / Jianwei Cheng, Yan Wu, Haiming Xu, Jin Liu, Yekang Yang, Huangjun Deng, Yi Wang // Tunneling and Underground Space Technology. 2015. Vol. 45. P.166–180.
- 8. Gendler, S.G. The justification of new technique ventilation at contraction of working with two exits in soil surface / S.G. Gendler // Eurasian Mining. -2016. N = 2. P.41-44.
- 9. Мохирев, Н.Н. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация / Н.Н. Мохирев, В.В. Радько. М.: Недра-Бизнесцентр, 2007. 324 с.
- 10. Krainov, A.V. Conjugate heat transfer in the interaction of the viscous liquid with technological elements of energy systems in conditions of their internal contour

- moving / A.V. Krainov, E.N. Pashkov., A.V. Ponomaryov // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1040. P. 876–880.
- 11. Aitao, Z. Role of Gas Ventilation Pressure on the Stability of Airway Airflow in Underground Ventilation / Z. Aitao, K. Wang // Journal of Mining Science. 2018. Vol. 54, № 12. P. 111–119.
- 12. Воропаев, А.Ф. Тепловая депрессия шахтной вентиляции / А.Ф. Воропаев. М.: АН СССР, 1950. 230 с.
- 13. Николаев, А.В. Управление тепловыми депрессиями в системах вентиляции калийных рудников: дис. ... канд. техн. наук / А.В. Николаев; Перм. нац. исслед. политех. ун-т. Пермь, 2012. 159 с.
- 14. Ломоносов, М.В. О вольном движении воздуха, в рудниках примеченном: диссертация / М.В. Ломоносов. – М., 1744.
- 15. Комаров, В.Б. Рудничная вентиляция / В.Б. Комаров, Д.Ф. Борисов. Л.: ГОНТИ, 1938. 454 с.
- 16. Борисов, Д.Ф. Определение депрессии естественной тяги методом подсчета / Д.Ф. Борисов // Заметки ЛГИ. 1941. Т. 14. С. 87–108.
- 17. Воропаев, А.Ф. Термодинамический метод определения депрессии естественной тяги в шахтах / А.Ф. Воропаев // Горный журнал. 1949. N_{\odot} 7. С. 21—26.
- 18. Вассерман, А.Д. Расчет воздухораспределения в вентиляционной сети при действии сложной естественной тяги / А.Д. Вассерман, С.П. Алехичев, К.П. Кротов // Проветривание карьеров и рудников с большими зонами обрушения. Л., 1966. С. 60–66.
- 19. Алехичев, С.П. Естественная тяга и тепловой режим рудников / С.П. Алехичев, Г.В. Калабин. Л.: Наука, 1974. 110 с.
- 20. Гращенков, Н.Ф. Учет естественной тяги при производстве депрессионных съемок в шахтах с несколькими рабочими зонами / Н.Ф. Гращенков // Труды КПИ. 1960. Вып. 4. С. 111–115.
- 21. Зельдин, Б.Б. О влиянии работы вентилятора на величину естественной тяги / Б.Б. Зельдин // Разработка месторождений полезных ископаемых. Киев: Техника, 1986. Вып. 74. С. 14—17.

- 22. Чабан, П.Д. Совершенствование комбинированных схем проветривания шахт. разрабатывающих многолетнемерзлые россыпи / П.Д. Чабан // Колыма. 1986. № 6. С. 4–7.
- 23. Шалимов, А.В. Теоретические основы прогнозирования. профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников: автореф. дис. . . . дра техн. наук / А.В. Шалимов; Горн. ин-т УрО РАН. Пермь, 2012. 34 с.
- 24. Kazakov, B.P. Stability of natural ventilation mode after main fan stoppage / B.P. Kazakov, A.V. Shalimov, M.A. Semin // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 86. P. 288–293.
- 25. Features of forming microclimatic conditions in mining excavations of deep mines / V.N. Karelin, A.V. Kravchenko, L.L. Yu, B.P. Kazakov, A.V. Zaitsev // Gornyi Zhurnal. 2013. Vol. 6. P. 65–68.
- 26. Захарова, Л.А. Исследование процесса возникновения поршневого эффекта в горных выработках при движении в них самоходного транспорта и его влияния на воздухораспределение: дис. ... канд. техн. наук / Л.А. Захарова; Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 1997. 174 с.
- 27. Об использовании поршневого действия поездов в тоннельной вентиляции метрополитена мелкого заложения / А.М. Красюк, И.В. Лугин, С.А. Павлов, А.Н. Чигишев // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: труды конф. с участием иностранных ученых. Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010. С. 252—257.
- 28. Красюк, А.М. Об эффекте возникновения циркуляционных колец и их влиянии на воздухораспределение в метрополитене мелкого заложения / А.М. Красюк, И.В. Лугин, С.А. Павлов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. Новосибирск, 2010. № 4. С. 75—82.
- 29. Павлов, С.А. Исследование воздухораспределения от поршневого действия поездов / С.А. Павлов // Сборник трудов молодых ученых. Новосибирск: Изд. ИГД СО РАН, 2010. Т. 2. С. 81–86.
- 30. Анализ способов регулирования режима работы тоннельных осевых вентиляторов / Д.В. Зедгенизов, А.М. Красюк, Н.А. Попов, А.Н. Чигишев // Метро. -2000. -№ 5-6. C. 23-27.

- 31. Решение задач вентиляции тоннелей на примере Новосибирского метрополитена / В.И. Соловьев, Ю.Г. Кузнецов, Н.А. Попов, Г.Ф. Салашин // Транспортное строительство. 1990. № 9. С. 28–30.
- 32. Петров, Н.Н. Управление воздухоподачей для технологических нужд как источник энергосбережения / Н.Н. Петров, Д.В. Зедгенизов // Промышленная энергетика. 2000. № 11. С. 5–10.
- 33. Казаков, Б.П. О проветривании рудника естественной тягой после отключения ВГП / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, Е.Л. Гришин // Горное эхо. — 2009. — № 4. — C. 19—24.
- 34. Пучков, Л.А. Аэродинамика подземных выработанных пространств / Л.А. Пучков. М.: МГГУ, 1993. С. 11–26.
- 35. Постникова, М.Ю. Влияние выработанных пространств на аэрогазодинамические процессы при аварийных режимах вентиляции рудников: дис. ... канд. техн. наук / М.Ю. Постникова. Тула, 2010. 191 с.
- 36. Левин, Л.Ю. Численное моделирование изменения воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях при реверсировании главной вентиляторной установки / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, Р.Р. Газизуллин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 12. С. 164—170.
- 37. Гитис, Ю.Л. Шахтная вентиляция. Автоматическая система управления и контроль за расходами / Ю.Л. Гитис, К.М. Кириллов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 5. С. 280–282.
 - 38. Perno, S. Infullcontrol / S. Perno // MiningMagazine. 2011. P. 59–61.
- 39. Палеев, Д.Ю. Сетевая задача проветривания горных выработок и выработанного пространства шахты / Д.Ю. Палеев // Вестн. Кузбасс. гос. техн. ун-та. 2006. № 5. C. 58-62.
- 40. Васенин И.М. Изменение характеристик вентиляционного потока при его реверсировании / И.М. Васенин, Д.Ю. Палеев, В.В. Вашилов // Вестн. Кузбасс. гос. техн. ун-та. -2006. -№ 6. C. 11-14.
- 41. Трофимов В.О. Визначення режиму провітрювання гірничої виробки / В.О. Трофимов, О.Л. Кавєра // Уголь Украины. 2009. № 5. С. 26—28.

- 42. Возможности оперативного управления в условиях действующих угольных шахт / М.А. Патрушев, Н.В. Карнаух, Е.Н. Самойленко [и др.] // Пробл. аэрологии современных горнодобывающих предприятий: тезисы докл. всесоюз. конф. М.: МГИ, 1980. С. 70–72.
- 43. Пономаренко, Т.В. Метод оптимизации параметров шахтной вентиляционной сети с учетом развития горных работ / Т.В. Пономаренко // Техника и технология горного производства: тезисы докл. молодых ученых и специалистов. Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1990. С. 94–95.
- 44. Пономаренко, Т.В. Метод оптимизации параметров развивающихся вентиляционных сетей / Т.В. Пономаренко // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. трудов / ИГТМ НАНУ. Днепропетровск, 1999. Вып. 13. С. 84–89.
- 45. Клебанов, Ф.С. Критерии аэродинамической нестабильности шахтной вентиляционной сети / Ф.С. Клебанов // Рудничная вентиляция и управление газовыделением. М.: ЦНИЭИуголь, 1972. С. 20–25.
- 46. Савельев, М.В. Метод оперативной оценки развивающихся вентиляционных сетей / М.В. Савельев, С.В. Федосеев // Изв. вузов Сев.-Кавк. регион. техн. -2004. -№ 1. C. 78–81.
- 47. Шницер, А.В. Анализ динамики изменения вентиляционной сети / А.В. Шницер // Управление вентиляцией и газодинамическими явлениями в шахтах. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1979. С. 71–75.
- 48. Каледина, Н.О. Резервы повышения эффективности подземной дегазации угольных пластов с целью улучшения условий труда шахтеров / Н.О. Каледина, В.А. Малашкина // Горный журнал. 2017. № 6. С. 86—89.
- 49. Compute rized simulation of mine ventilation networks for sustainable decision making process / M.C. Suvar, C. Lupu, V. Arad, D. Cioclea, V.M. Plsculescu, N. Mija // Environmental Engineering and Management Journal. − 2014. − Vol. 13, № 6. − P. 1445–1451.
- 50. Компьютерная технология проектирования, оперативного контроля и управления проветриванием на угольных шахтах / В.Я. Потемкин, П.Л. Лимаренко, Т.В. Пономаренко [и др.] // Сб. науч. трудов. Днепропетровск: Изд-во НГАУ, 1999. Вып. 5. С. 85—87.

- 51. Каледина, Н.О. Компьютерное моделирование шахтных вентиляционных сетей / Н.О. Каледина, С.Б. Романченко, В.А. Трофимов. М.: Изд-во МГГУ. 52 с.
- 52. Способ оперативного управления распределением воздушных потоков и аэродинамических напоров в системе горных выработок угольных шахт / О.С. Токарев, В.Б. Попов, А.С. Голик, Ли Хи Ун, А.С. Ярош // Вестник Вост-НИИ. $2018. N \cdot 4. C. 31 38.$
- 53. Попов, В.Б. Организация проветривания угольных шахт в аварийных ситуациях / В.Б. Попов, Х.У. Ли, В.Г. Игишев // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. № 4. С. 62—65.
- 54. Палеев, Д.Ю. Изменение характеристик вентиляционного потока в горных выработках под влиянием работы вентилятора / Д.Ю. Палеев, В.В. Ващилов // Вестн. Кузбасс. гос. техн. ун-та. Кемерово, 2006. № 6. С. 23–27.
- 55. Тимухин, С.А. Потери давления на главных вентиляторных установках / С.А. Тимухин // Известия вузов. Горный журнал. 1987. № 10. С. 115—117.
- 56. Макаров, В.Н. Анализ и предложения по повышению аэродинамической нагруженности шахтных вентиляторов / В.Н. Макаров, С.А. Горбунов, Т.А. Корнилова // Известия Уральского государственного горного университета. Екатеринбург, 2013. Вып. 3 (31). С. 28–32.
- 57. Фомин, В.И. Аэродинамическая характеристика центробежного вентилятора с радиальным энергетическим регулятором / В.И. Фомин // Известия УГГУ. 2010. Вып. 24. С. 111–114.
- 58. Косарев, Н.П. Математические модели аэродинамики вращающихся круговых решеток аналитических профилей произвольной формы со струйным управлением циркуляцией / Н.П. Косарев, В.Н. Макаров. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. 93 с.
- 59. Лепихов, А.Г. Естественная тяга, вызываемая работой вентилятора главного проветривания / А.Г. Лепихов, В.Н. Шевченко // Вопросы проветривания и безопасности в угольных шахтах. Донецк, 1970. Ч. 1. С. 94–98.
- 60. Modeling mine aerology problems / N. Petrov, M. Shishkin, V. Dnitriev, V. Shadrin // Journal of Mining Science. 1992. Vol. 28 (2). P. 185–191.

- 61. Petrov, N. Methods of solving problems and designing equipment for mine ventilation / N. Petrov // Journal of Mining Science. 1994. Vol. 30 (2). P. 195–204.
- 62. Kychkin, A. IoT-based mine ventilation control system architecture with digital twin / A. Kychkin, A. Nikolaev // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) = ICIEAM 2020: proceedings, Sochi, Russian Federation, 18–22 May 2020. (s. 1.): IEEE, 2020. Art. 9111995. 5 p.
- 63. Брусиловский, И.В. Экспериментально исследование пульсаций давления в осевом вентиляторе / И.В. Брусиловский, И.А. Колчанова // Аэроупругость турбомашин. Новосибирск: ИГ СО АН СССР, 1984. С. 121–127.
- 64. Эффективные способы проветривания шахт и выемочных участков / А.В. Лебедев, В.И. Клишин, В.И. Мурашев, Д.В. Ботвенко // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. − 2012. − № 1. − С. 104–111.
- 65. Ли Хи Ун. Разработка метода управления аэрогазодинамическими процессами в горных выработках углекислотообильных шахт: дис. ... д-ра техн. наук / Ли Хи Ун; Научный центр по безопасности работ в угольной промышленности ВостНИИ (НЦ ВостНИИ). Кемерово, 2003. 234 с.
- 66. Красноштейн, А.Е. Расчет газовой динамики при рециркуляционном проветривании добычного участка / А.Е. Красноштейн, Г.З. Файнбург // Вентиляция шахт и рудников. Л., 1978. Вып. 5. С. 26–32.
- 67. Колмаков, В.А. Новое научное направление рудничной аэрологии комплексное управление аэрогазодинамикой шахт / В.А. Колмаков // Вопросы безопасности труда: сборник науч. трудов. Кузбасс. гос. техн. ун- т. Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2004. Вып. 3. С. 7–13.
- 68. Методологические основы совершенствования шахтной вентиляционной системы / А.Ф. Булат, И.А. Ефремов, В.Г. Илюшенко, Б.В. Бокий, Т.В. Бунько, И.Е. Кокоулин // Геотехническая механика: межвед. сб. научных трудов. Днепропетровск, 2002. Вып. 37. С. 23–30.
- 69. Бокий, Б.В. О формализованном инвариантном способе описания нелинейными многополюсниками зон шахтной вентиляционной сети с неопределенными структурой и аэродинамическими параметрами / Б.В. Бокий,

- Т.В. Бунько // Геотехническая механика: межвед. сб. научных трудов. Днепропетровск, 2011. Вып. 92. С. 264–274.
- 70. Зинченко, И.Н. Перераспределение воздуха на выемочном участке при изменении режима его проветривания / И.Н. Зинченко, М.В. Кравченко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. Новосибирск: Наука, 1990. С. 125–126.
- 71. Branny, M. Numeraczna symulacja proctsu wentylacji w wyrobiskach slepych / M. Branny // Gor. i geoinz. 2005. Vol. 29, № 1. P. 9–20.
- 72. Пучков, Л.А. Моделирование безопасного плавного регулирования вентиляции выемочного участка шахты / Л.А. Пучков, Т.Т. Егорова, В.Н. Нестеренко // Известия вузов. Горный журнал. 1982. № 6. С. 47–49.
- 73. Клебанов, Ф.С. Аэродинамическое управление газовым режимом в шахтных вентиляционных сетях / Ф.С. Клебанов. М.: Наука, 1974. 135 с.
- 74. Левицкий, Ж.Г. Определение расхода воздуха в сети при колебаниях аэродинамических параметров / Ж.Г. Левицкий // Известия вузов. Горный журнал, $1976. N \circ 7. C. 56-61.$
- 75. О практике управления газовыделением и снижения углекислото-обильности горных выработок / И.Д. Мащенко, Х.У. Ли, Ю.М. Филатов, А.Н. Кнышенко // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2011. N = 1. C.91—99.
- 76. Сазонов, М.С. Влияние проветривания горных выработок на геодинамическую безопасность выемочных участков / М.С. Сазонов, В.Г. Казанцев, Д.В. Ботвенко // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2013. № 1–2. С. 23–29.
- 77. Апальков, А.С. Безопасность шахтеров в аварийных условиях угольных шахт / А.С. Апальков, А.С. Голик, В.А. Зубарева // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2011. № 2. С. 81–83.
- 78. Осинцева, А.В. Оптимизация размещения регуляторов воздухорапсределения в вентиляционной сети подземного рудника на основе анализа взаимосвязи параметров сети и применения генетического алгоритма: дис. ... канд.

- техн. наук / А.В. Осинцева; Учрежд. Рос. академ. наук Горн. инст-т КНЦ РАН. Апатиты, 2011. 129 с.
- 79. Зедгенизов, Д.В. Разработка системы автоматического управления главным вентилятором при автоматизации проветривания шахт: дис. ... канд. техн. наук / Д.В. Зедгенизов; Институт горного дела СО РАН. Новосибирск, 2001. 187 с.
- 80. Пронько, В.С. Структура и энергосберегающие алгоритмы управления частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов главного проветривания: дис. ... канд. техн. наук / В.С. Пронько; Национальный горный минерально-сырьевой университет. СПб., 2016. 174 с.
- 81. Круглов, Ю.В. Теоретические и технологические основы построения систем оптимального управления проветриванием подземных рудников: дис. ... д-ра техн. наук / Ю.В. Круглов. Пермь, 2012. 340 с.
- 82. Круглов, Ю.В. Основы построения оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников / Ю.В. Круглов, Л.Ю. Левин // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2010. Вып. 2. С. 104–109.
- 83. Тян, Р.Б. Управление проветриванием шахт / Р.Б. Тян, В.Я. Потемкин. Киев: Наукова думка, 1977. 204 с.
- 84. Тян, Р.Б. Управляемость вентиляционной сети шахты / Р.Б. Тян, В.Я. Потемкин, С.В. Садончик // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1974. N = 6. С. 87-92.
- 85. Хоменко, Н.П. Оптимальное распределение воздуха в проектируемых шахтных вентиляционных сетях / Н.П. Хоменко // Известия вузов. Горный журнал. 1977. № 11. С. 72—77.
- 86. Цой, С. Оптимальное управление расходами воздуха методом выравнивания депрессий / С. Цой, Г.П. Данилина // Проветривание выработок и обеспыливание атмосферы рудников Казахстана. Алма-Ата: Наука, 1967. С. 21–30.
- 87. Способ оперативного управления распределением воздушных потоков и аэродинамических напоров в системе горных выработок угольных шахт

- / О.С. Токарев, В.Б. Попов, А.С. Голик, Х.У. Ли, А.С. Ярош // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2018. № 4. С. 31–38.
- 88. Голик, А.С. Обеспечение безопасности жизнедеятельности в аварийных условиях на угольных шахтах / А.С. Голик, В.А. Зубарева, А.С. Апальков // Безопасность жизнедеятельности. 2009. № 7 (103). С. 10—12.
- 89. Казаков, С.П. Проветривание подготовительных выработок угольных шахт Кузбасса: монография / С.П. Казаков, А.М. Ермолаев, С.А. Прокопенко; Юргинский технологический институт. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 211 с.
- 90. Ермолаев, А.М. Обоснование способов и средств эффективного проветривания тупиковых выработок угольных шахт: дис. ... д-ра техн. наук / А.М. Ермолаев. Кемерово. Пермь, 2004. 315 с.
- 91. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Серия 03. Вып. 78. М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. 276 с.
- 92. Алыменко, Н.И. Влияние естественной тяги воздухоподающих стволов на проветривание калийных рудников / Н.И. Алыменко, А.А. Норин, В.В. Минин // Вентиляция шахт и рудников. Интенсификация воздухообмена и пылегазообразование в горных выработках. Л.: Изд-во ЛГИ, 1989. С. 54–57.
- 93. Результаты исследования системы вентиляции рудника БКПРУ-2 в холодное время года / Н.И. Алыменко, А.В. Николаев, А.А. Каменских, А.П. Тронин // Вестник Пермского университета. Геология. 2011. № 3. С. 89–96.
- 94. СНиП 23-01-99. Строительные нормы и правила Российской Федерации. Строительная климатология: утв. постановлением Госстроя России № 49 от 11.06.99. М.: Госстрой России, 2000. 68 с.
- 95. Киселева, Н.И. Температура воздуха в воздухоподающих стволах Верхнекамского калийного месторождения / Н.И. Киселева, Ю.П. Ольховиков // Сб. научн. тр. Перм. политех. ин-та. − 1977. − № 206. − С. 72–75.

- 96. ГОСТ 21563-93. Котлы водогрейные. Основные параметры и технические требования: принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации 15.03.94. М.: Изд-во стандартов, 1996 (2003). 6 с.
- 97. Левин, Л.Ю. Исследование и разработка энергосберегающих систем воздухоподготовки для рудников: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Л.Ю. Левин. Пермь, 2004. 20 с.
- 98. Левин, Л.Ю. Общие принципы работы безвентиляторных систем отопления шахтных стволов / Л.Ю. Левин // Проблемы безопасности и совершенствования горных работ: тез. докл. междунар. конф. Пермь, 1999. С. 142–144.
- 99. Вентиляторные эжекторные установки для рудников / Н.И. Алыменко, Д.Н. Алыменко, А.И. Коровин, С.В. Пшеничников // Горный журнал. 2013. № 6. С. 73—77.
- 100. Андреев В.Г. Эжектор большой производительности для подземных рудников / В.Г. Андреев, Л.Д. Дьяконов, Р.А. Коломиец // Совершенствование горной техники и технологии для открытых и подземных работ. Л., 1983. С. 137—140.
- 101. Проветривание выработок с помощью эжекторов / Л.Д. Дьяконов, В.В. Степин [и др.] // Исследование, разработка и эксплуатация нового горного оборудования. Л., 1982. С. 139–142.
- 102. Мохирев, Н.Н. Исследование работы эжектирующих установок в рудничных вентиляционных сетях: дис. ... канд. техн. наук / Н.Н. Мохирев; Пермский политехнический институт. Пермь, 1971. 217 с.
- 103. Мохирев, Н.Н. Определение режимов работы и мест установки вентиляторов-эжекторов / Н.Н. Мохирев // Вентиляция шахт и рудников. 1980. № 7. 1980. C. 50–55.
- 104. Мохирев, Н.Н. Вспомогательные вентиляторные установки эжектирующего типа / Н.Н. Мохирев, В.В. Радько, А.С. Попов // Технология ведения горных работ и производство машин и механизмов для горнодобывающей промышленности: сборник трудов / Западно-Уральский машиностроительный концерн; ООО «ЗУМК-Инжиниринг». Пермь, 2007. Вып. 3. С. 153–159.

- 105. Печук, И.М. Типовые эжекторы сжатого воздуха / И.М. Печук. М.: Стройтопливоиздат, 1948. – С. 20.
- 106. Алыменко, Н.И. Главные вентиляторные установки эжекторного типа / Н.И. Алыменко, Д.Н. Алыменко, А.А. Кравцов // Технология ведения горных работ и производство машин и механизмов для горнодобывающей промышленности: сборник трудов / Западно-Уральский машиностроительный концерн; ООО «ЗУМК-Инжиниринг». Пермь, 2007. Вып. 3. С. 147–152.
- 107. Мальцев, С.В. Исследование и разработка способов определения аэродинамических параметров сложных вентиляционных систем подземных рудников: дис. ... канд. техн. наук / С.В. Мальцев. Пермь, 2019. 148 с.
- 108. Алыменко, Д.Н. Анализ вентиляционных сетей с большим эквивалентным отверстием / Д.Н. Алыменко // Наука в решении проблем Верхнекамского промышленного региона. Березники, 1988. Вып. 1. С. 196–201.
- 109. Алыменко, Н.И. Исследование и разработка методов управления динамическими системами «Главные вентиляторные установки рудничная вентиляционная сеть» / Н.И. Алыменко // Проблемы безопасной разработки калийных месторождений. Минск, 1990. С. 135–136.
- 110. Оценка энергетической эффективности шахтных вентиляционных сетей и главных вентиляторных установок / С.А. Тимухин, В.В. Шлейвин, С.А. Упоров, С.В. Шашков // Известия Уральского государственного горного университета. 2005. Вып. 20. С. 74–77.
- 111. Азаров, С.И. Анализ риска при пожаре в угольной шахте / С.И. Азаров // Уголь Украины. -2001. № 2. С. 43—45.
- 112. Мельникова, Я.В. Оценка устойчивости проветривания горных выработок при пожарах / Я.В. Мельникова, Ю.Ф. Булгаков, В.А. Трофимов // Уголь Украины. 2011. № 5. С. 23–26.
- 113. Trevits, M.A. Testing and evaluation of an inflatable temporary ventilation control device / M.A. Trevits, C. McCartney, H.J. Roelots // Printed works of SME Annual Meeting and Exhibit. Denver, Colorado. 2009. February 22–25. P. 9–18.

- 114. Гражданкин, А.И. Анализ опасностей и оценка риска крупных аварий в нефтегазовой и угольной промышленности: дис. ... д-ра техн. наук / А.И. Гражданкин; Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности. Москва, 2016. 340 с.
- 115. Lagadec, P. Major Technological Risk. An assessment of Industrial Diasasters / P. Lagadec. Oxford: Pergamon Press, 1982. 104 p.
- 116. Новоселов, С.В. Травматизм на угольных шахтах России и проблема прогноза определения вероятности наступления аварийной ситуации взрыва метана в очистном забое сверхкатегорийной шахты / С.В. Новоселов, С.А. Панихидников // Уголь. 2017. № 9. С. 32—35.
- 117. Таразанов, И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2017 года / И.Г. Таразанов // Уголь. -2018. -№ 3. С. 58–73.
- 118. Яновский, А.Б. Основные тенденции и перспективы развития угольной промышленности России / А.Б. Яновский // Уголь. 2017. № 8. С. 10—14.
- 119. Управление рисками при разработке угольных месторождений подземным способом / А.И. Фомин, В.Г. Казанцев, Д.В. Ботвенко, М.Н. Халявина, А.М. Ермолаев // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2018. – № 4. – С. 54–62.
- 120. Анализ и управление риском крупных аварий на угольных шахтах России / А.Ф. Павлов, С.И. Голоскоков, С.В. Шатиров, А.В. Сурков // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2012. N 2. С. 125—135.
- 121. Влияние единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на риск гибели людей при пожарах / А.И. Фомин, Д.А. Бесперстов, В.Б. Попов, С.Ю. Сайбель // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2018. № 1. С. 73–76.
- 122. Кобылкин, С.С. Методологические основы системного проектирования вентиляции шахт: дис. ... д-ра техн. наук / С.С. Кобылкин; НИТУ МИСиС, Горный институт. Кемерово, 2018. 310 с.

- 123. Salaun, S. Un mode d'intoxication rare par les hydrocarbures. Les marées noires. Thèse de Doctorat d'Etat en Médecine / S. Salaun. Université de Bordeaux III, 1980. 58 p.
- 124. Гражданкин, А.И. Промышленная безопасность отечественной и мировой угледобычи / А.И. Гражданкин, А.С. Печеркин, М.А. Иосиф // Безопасность труда в промышленности. № 9. 2010. С. 36—43.
- 125. Круглов, Ю.В. Разработка проекта технического перевооружения вентиляционной сети рудника БКПРУ-4 ОАО «Уралкалий» с системой автоматического оптимального управления проветриванием и регулируемой рециркуляцией / Ю.В. Круглов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 11 / ГИ УрО РАН. Пермь, 2013. С. 260–262.
- 126. Кормщиков, Д.С. Исследование и разработка систем аэрогазодинамической безопасности подземных рудников: дис.... канд. техн. наук / Д.С. Кормщиков. – Пермь, 2015. – 120 с.
- 127. Мохирев, Н.Н. Моделирование аварийных ситуаций в шахтах с целью создания безопасных условий эвакуации горнорабочих / Н.Н. Мохирев, М.Ю. Постникова // Математическое моделирование в естественных науках: тез. докл. 16-й Всерос. конф. молод. ученых. Пермь: Изд-во ПГТУ, 2007. С. 63–64.
- 128. Попов, В.Б. Об аэродинамике выработанного пространства при отработке угольного пласта / В.Б. Попов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1990. № 6. С. 77—80.
- 129. Син, С.А. Повышение безопасности и эффективности использования азота для борьбы с самовозгоранием угля в выработанном пространстве шахт / С.А. Син, В.А. Портола, В.Г. Игишев // Уголь. 2019. № 2 (1115). С. 11—14.
- 130. Критерии, влияющие на время и вероятность обеспечения безопасности работников посредством средств спасения / Д.А. Бесперстов, А.И. Фомин, В.В. Соболев, А.М. Ермолаев, В.Г. Игишев // Безопасность труда в промышленности. 2018. № 9. С. 78–84.

- 131. Cygankiewicz, J. Determination of critical conditions of spontaneous combustion of coal in longwall gob areas / J. Cygankiewicz // Arch. Min. Sci. 2015. Vol. 60, № 3. P. 761–776.
- 132. Методология моделирования фильтрации газовоздушных смесей в выработанном пространстве выемочного участка / Ю.М. Говорухин, А.Н. Домрачев, В.Г. Криволапов, Д.Ю. Палеев, М.Ю. Балаганский // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. − 2011. № 1–2011. С. 72–76.
- 133. Acuna, E.I. A summary of the computational fluid dynamic application to the new level mine project of El Teniente / E.I. Acuna, J.P. Hurtado, K.G. Wallace // 10th International mine ventilation congress, IMVC2014, The mine ventilation Society of South Africa. 2014. P. 91–97.
- 134. Experemental and numerical analysis of the air flow in T-shape channel flow / Janusz Szmyd, Marian Branny, Michal Karch, Waldemar Wodziak, Marek Jaszczur, Remigiusz Nowak // Arch. Min. Sci. − 2013. − Vol. 58, № 2. − P. 333–348.
- 135. Modelling of underground coal gasification process using CFD methods / J. Wachowicz, J.M. Laczny, S. Iwaczenko, T. Janoszek, M. Cempa-Balewicz // Arch Min. Sci. 2015. Vol. 60, № 3. P. 663–676.
- 136. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты / И.М. Васенин, Э.Р. Шрагер, А.Ю. Крайнов, Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов, В.Н. Костеренко // Компьютерные исследования и моделирование. 2011. Т. 3, № 2. С. 155–163.
- 137. Средства коллективной защиты шахтеров и горноспасателей в аварийных условиях шахт / А.С. Голик, В.А. Зубарева, А.С. Апальков, Р.П. Журавлев // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 1. С. 16—19.
- 138. Голик, А.С. Безопасность жизнедеятельности горняков и горноспасателей при чрезвычайных ситуациях в угольных шахтах / А.С. Голик, А.Ф. Син, В.Р. Дингес // ТЭК и ресурсы Кузбасса. 2004. № 1. С. 47.

- 139. Как сохранить жизнь шахтера в аварийных условиях шахты / А.С. Голик, В.Б. Попов, А.С. Ярош, О.С. Токарев // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2018. № 3. С. 63–68.
- 140. Кормщиков, Д.С. Применение программного модуля «Электронный план ликвидации аварий» / Д.С. Кормщиков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2010. Т. 9, № 5. С. 86–89.
- 141. Красноштейн, А.Е. Диффузионно-сетевые методы расчета проветривания шахт и рудников / А.Е. Красноштейн, Г.З. Файнбург. Екатеринбург, 1992. 243 с.
- 142. Скляров, Л.А. Аналитический метод решения задач по естественному распределению воздуха в простом диагональном соединении выработок / Л.А. Скляров // Труды Донецкого индустриального института. 1959. Т. 35, вып. 4. С. 72—74.
- 143. Зайцев, А.В. Исследование процессов тепломассопереноса в горных выработках при применении систем частичного повторного использования воздуха / А.В. Зайцев, Ю.А. Клюкин, А.С. Киряков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2014. № 11. С. 121–129.
- 144. Левин, Л.Ю. Исследование рециркуляционного способа проветривания калийных рудников и его экономическая эффективность / Л.Ю. Левин, Ю.В. Круглов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 10. С. 39—48.
- 145. Lawton, B.R. Local cooling underground by recirculation / B.R. Lawton // Transaction of the Inst. Of Mining Engineers. 1933. Vol. 90. P. 63–68.
- 146. Andrews, O.E. Ventilation of lake Shore Mines / O.E. Andrews // Mining in Canada. Northern Mine Press LTD, 1957. 45 p.
- 147. Ventilation of South African Gold Mines // The South African Mining and Eng. J. $-1961. N_{\odot} 6. P. 88-94.$
- 148. Morris, I.N. Changes in the approach to ventilation in recent years / I.N. Morris, G. Walker // The Mining Eng. 1982. Vol. 141, № 244. P. 401–413.

- 149. Vutukuri, V.S. How to maximize the recirculation of used air / V.S. Vutukuri, R.D. Lama // Tunnel and Tunneling. 1988. № 10. P. 57–59.
- 150. Ушаков, К.3. О газовой динамике при работе подземных вентиляторов с рециркуляцией / К.3. Ушаков // Безопасность труда в промышленности. 1975. № 6. С. 64—68.
- 151. Мохирев, Н.Н. Использование рециркуляции воздуха при проветривании калийных рудников / Н.Н. Мохирев // Известия вузов. Горный журнал. 1987. № 9. С. 47—51.
- 152. Файнбург, Г.З. О расчете проветривания вентиляционных сетей добычного участка в режиме рециркуляции / Г.З. Файнбург, В.И. Фоминых // Разработка соляных месторождений. Пермь, 1980. С. 60–64.
- 153. Красноштейн А.Е. Расчет газовой динамики при рециркуляционном проветривании добычного участка / А.Е. Красноштейн, Г.З. Файнбург // Вентиляция шахт и рудников. Л., 1978. Вып. 5. С. 26–32.
- 154. Головатый, И.И. Шахтная вентиляторная установка с системой автоматического управления для рециркуляционного проветривания калийных рудников / И.И. Головатый, Ю.В. Круглов, Л.Ю. Левин // Горный журнал. $2010. \mathbb{N} 8. \mathbb{C}. 78-80.$
- 155. Круглов, Ю.В. Моделирование переходных процессов в вентиляционных сетях подземных рудников / Ю.В. Круглов, Л.Ю. Левин, А.В. Зайцев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2011. № 5. С. 101–109.
- 156. Баскаков, В.И. Пожары на конвейерном транспорте / В.И. Баскаков, Г.К. Герасимов, В.С. Лудзиш // Безопасность труда в промышленности. 2000. N = 1. C.41-47.
- 157. Мохирев, Н.Н. Влияние естественной тяги на воздухораспределение при аварийных ситуациях / Н.Н. Мохирев // Технология подземной разработки калийных месторождений: межвуз. сб. научн. тр. Пермь, 1988. С. 120–125.
- 158. Мохирев, Н.Н. Оценка влияния естественной тяги на вентиляцию блоков калийного рудника / Н.Н. Мохирев // Тезисы докладов XXXI научно-

- технической конференции горно-нефтяного факультета ПГТУ. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2002. С. 90–91.
- 159. Мохирев, Н.Н. Разработка современных методов и средств обеспечения высокоэффективного проветривания рудников, обладающих малыми аэродинамическими сопротивлениями: дис. . . . д-ра техн. наук / Н.Н. Мохирев; Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 1994. 302 с.
- 160. Исследование влияния естественной тяги на воздухораспределение в панелях, отрабатывающих наклонные пласты / Н.Н. Мохирев, А.Н. Чистяков, М.Ю. Постникова, А.В. Николаев // Проблемы комплексного освоения месторождений полезных ископаемых в Пермском крае: материалы краевой науч.-техн. конф. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. С. 290–295.
- 161. Мохирев, Н.Н. Выбор схем вентиляции крыльев, панелей и блоков калийного рудника с учетом фактора возникновения и влияния тепловых депрессий / Н.Н. Мохирев, М.Ю. Постникова, А.В. Николаев // Рудник будущего: проекты, технологии, оборудование: сб. трудов межд. науч.-практич. конф. ООО «Проектное бюро «Рейкьявик»». Пермь, 2009. Вып. 5. С. 88–91.
- 162. Николаев, А.В. Влияние различных факторов на воздухораспределение в блоках, отрабатывающих наклонные пласты / А.В. Николаев // Рудник будущего: проекты, технологии, оборудование. $2010. \mathbb{N} 2. \mathbb{C}$. 97—103.
- 163. Николаев, А.В. Мероприятия, предназначенные для защиты горнорабочих от отравления угарным газом в случае возникновения пожара в конвейерном штреке блока калийного рудника / А.В. Николаев, Н.И. Алыменко, В.А. Николаев // Рудник будущего. 2012. № 2 (10). С. 67–70.
- 164. Николаев, А.В. Способ проветривания выемочного участка калийного рудника при обратном порядке отработки / А.В. Николаев, Н.И. Алыменко // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 2. С. 228—234.
- 165. Луговский, С.И. Проветривание глубоких рудников / С.И. Луговский. М.: Госгортехиздат, 1962. 324 с.

- 166. Шувалов, Ю.В. Регулирование теплового режима шахт и рудников Севера: Ресурсосберегающие системы / Ю.В. Шувалов. Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1988. 196 с.
- 167. Малахов, Г.М. Вскрытие и разработка рудных месторождений на больших глубинах / Г.М. Малахов, А.П. Черноус. М.: Госгортехиздат, 1962.
- 168. Barenbrug, A.W. Deep Level Mining. Observations on the Kolar Field /
- A.W. Barenbrug // The South African Mining and Engineering Journal. 1948. N 2886.
- 169. Caw, J.M. The Colar Gold Field / J.M. Caw // Mine and Quarry Engineering. 1956. Vol. 22, № 7. P. 238–296.
- 170. Rutherford, J.G. Ventilation heat Exchanger at Inco's Greighton Mine / J.G. Rutherford // Canadian Mining Journal. 1958. Vol. 79, № 10. P. 97–100.
- 171. Правила безопасности в угольных шахтах: Приказ Ростехнадзора N 550 от 19.11.2013. М., 2014.
- 172. Термошахтная разработка нефтяных месторождений / Ю.П. Коноплев, В.Ф. Буслаев, З.Х. Ягубов, Н.Д. Цхадая; под ред. Н.Д. Цхадая. М.: Недра-Бизнесцентр, 2006. 288 с.
- 173. Chertenkov, M.V. The Yarega Heavy Oil Field–History, Experience, and Future / M.V. Chertenkov, V.V. Mulyak, Y.P. Konoplev // Journal of Petroleum technology. 2012. № 4. P. 158–160.
- 174. Исаевич, А.Г. Особенности проветривания нефтешахты / А.Г. Исаевич // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы науч. сессии Горн. ин-та УрО РАН. Пермь, 2012. Вып. 10. С. 247–248.
- 175. Минин, В.Е. Воздухонагреватели для систем вентиляции и кондиционирования воздуха / В.Е. Минин. М.: Стройиздат, 1976. 199 с.
- 176. Дударь, О.И. Подбор холодильного оборудования при проветривании тупиковых выработок / О.И. Дударь, Е.С. Дударь // Горное оборудование и электромеханика. 2016. № 9. С. 14–18.
- 177. Щербань, А.Н. Научные основы расчета и регулированиятеплового режима глубоких шахт / А.Н. Щербань, О.А. Кремнев. Киев: Изд-во АН УССР, 1959. Т. 1. 425 с.

- 178. Дударь, Е.С. Расчет параметровмикроклимата с учетом конденсации влаги в рудничной вентиляционной сети / Е.С. Дударь, О.И. Дударь, Н.Н. Мохирев // Горный информационно-аналитический бюллетень. − 2011. − № 7. − С. 331–344.
- 179. Li, M. Refrigerant air conditioning systems operating in coal mine feasibility analysis utilized / M. Li // Applied mechanies and materials. 2013. Vol. 433–435. Chapter 17: Research and Design in Mechanical Engineering. P. 2231–2234. DOI: 10.4028/AMM.433-435.2231
- 180. Galizaya, F. Guidelines for installing and operating Booster fans in underground mines / F. Galizaya // Proceedings the 9th school of mines. Dhanbad, India, 2009. P. 727–735.
- 181. McPherson, M.J. Refrigeration plant and mine air conditioning systems. Subsurface ventilation and environmental engineering / M.J. McPherson. 1993. P. 651–738. DOI: 10.1007/978-94-011-1550-6_18
- 182. Watzlaf, R. George. Underground mine water for heating and cooling using geothermal heat pump systems / George R. Watzlaf, Terry E. Ackman // Mine water and the environment. -2006. -P. 1-14.
- 183. Зайцев, А.В. Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников: дис. . . . д-ра техн. наук / А.В. Зайцев. Пермь, 2019. 247 с.
- 184. Воропаев, А.Ф. Тепловое кондиционирование рудничного воздуха в глубоких шахтах / А.Ф. Воропаев. М.: Недра, 1979. 192 с.
- 185. Казаков, Б.П. Формирование и нормализация микроклимата подземных рудников при разработке месторождений калийных солей: дис. ... д-ра техн. наук / Б.П. Казаков. Пермь, 2001. 313 с.
- 186. Шемаханов, М.М. Основы термодинамики и кондиционирования рудничной атмосферы / М.М. Шемаханов. М.: Недра, 1974. 206 с.
- 187. Система для локального охолодження повітря в лаві: пат. 7451 Украина: МПК E21F9/00 / Яковенко А.К., Мартинов А.А.; заявитель и патентообладатель Державний Макіївський науково-дослідний інститут з безпекиробіт

- у гірничій промисловості. № 20041210548 заявл. 21.12.2004; опубл. 15.06.2005, Бюл. № 6.
- 188. Система для локального охолодження повітря в лаві: пат. 24662 Украина: МПК Е21F9/00 / Яковенко А.К., Мартинов А.А.; заявитель и патентообладатель Державний Макіївський науково-дослідний інститут з безпекиробіт у гірничій промисловості. № u200701906 заявл. 23.02.2007; опубл. 10.07.2007, Бюл. № 10.
- 189. Тюнькин, Б.А. Опыт подземной разработки нефтяных месторождений и основные направления развития термошахтного способа добычи нефти / Б.А. Тюнькин, Ю.П. Коноплев Ухта: ПечорНИПИнефть, 1996. 160 с.
- 190. Коноплев, Ю.П. Внедрение новых методов термошахтной разработки на Ярегском месторождении высоковязкой нефти / Ю.П. Коноплев, В.Э. Гуляев // Нефтяное хозяйство. -2011. № 2. С. 89-91.
- 191. Повышение эффективности подземной добычи нефти термошахтным способом / Д.Г. Закиров, Р.А. Файзрахманов, А.В. Николаев, Н.Ф. Шаякбаров // Нефтяное хозяйство. 2014. N = 6. С. 58—60.
- 192. Теплообменное устройство для охлаждения шахтной вентиляционной струи: пат. 2476798 Рос Федерация: МПК F28С 1/00, F24F 9/00 / Закиров Д.Г., Боринских И.И., Закиров Г.Д., Мухамедшин М.А., Гуляев В.Э., Кузнецов С.А.; заявитель и патентообладатель УРАН «Горный институт УрО РАН». № 2011119716/06; завл. 16.05.2011; опубл. 27.02.2013, Бюл. № 6.
- 193. Круглов, Ю.В. Методы борьбы с повышенными температурами шахтной атмосферы в рабочих зонах нефтяных шахт Ярегского нефтяного месторождения / Ю.В. Круглов // Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений: тр. VI Междунар. конф., г. Екатеринбург, 10–11 апр. 2019 г. / Урал. гос. горн. ун-т. Екатеринбург, 2019. С. 284–293.
- 194. Мартынов, А.А. К вопросу уменьшения риска тепловых поражений горнорабочих в выработках глубоких шахт / А.А. Мартынов, А.К. Яковенко, В.И. Король // Горный информационно-аналитический бюллетень (научнотехнический журнал). -2004. N = 5. C. 268-271.

- 195. Цхадая, Н.Д. Критерий оценки оптимальных условий труда в горных выработках нефтяных шахт / Н.Д. Цхадая, А.Е. Жуйков, З.Х. Ягубов // Нефтегазовое дело. 2012. № 5. С. 318—326.
- 196. Бойко, В.А. Способ ускоренного формирования теплоуравнивающей рубашки горной выработки глубокой шахты / В.А. Бойко, А.В. Бойко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). -2004. N = 10. C.86-90.
- 197. Казаков, Б.П. Проектирование систем кондиционирования воздуха для нефтяных шахт Ярегского месторождения / Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, А.В. Шалимов // Горное эхо. 2012. № 1 (47). С. 22–23.
- 198. Правила безопасности при разработке нефтяных месторождений шахтным способом. М., 1986. 250 с.
- 199. Николаев, А.В. Об энерго- и ресурсосберегающем проветривании подземных горных выработок / А.В. Николаев, Г.З. Файнбург // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2015. № 14. С. 92—98. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.14.10
- 200. Николаев, А.В. Способ проветривания уклонных блоков нефтешахт, повышающий энергоэффективность подземной добычи нефти / А.В. Николаев // Нефтяное хозяйство. -2016. -№ 11. C. 133-136.
- 201. Николаев, А.В. Применение системы кондиционирования воздуха с учетом тепловых депрессий, действующих между стволами / А.В. Николаев, Н.И. Алыменко // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 12. С. 12—15.
- 202. Алыменко, Н.И. Регулирование режимов работы ГВУ при использовании поверхностной системы кондиционирования воздуха на руднике Усольского калийного комбината / Н.И. Алыменко, А.В. Николаев // Научные исследования и инновации. 2011. Т. 5. № 1. С. 143—145.
- 203. Mackay, L. Refrigeration and cooling concepts for ultra-deep platinum mining / L. Mackay, S. Bluhm, J. Van Rensburg // The 4th International Platinum

- Conference, Platinum in transition «Boom or Bust», The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2010.
- 204. McPherson, M.J. Subsurface ventilation and Environmental engineering / M.J. McPherson. Chapman & Hall, 2009. 824 p.
- 205. Айвазян, С.А. Прикладная статистика в задачах и упражнениях / С.А. Айвазян, В.С. Мхитарян. М: ЮНИТИ, 2001. 270 с.
- 206. Ашмарин, И.П. Быстрые методы статистической обработки и планирования эксперимента / И.П. Ашмарин, Н.Н. Васильев, В.А. Амбросов. Л.: Изд-во ЛГУ, 1971. 78 с.
- 207. Каримов, Р.Н. Обработка экспериментальной информации / Р.Н. Каримов. Саратов: Изд-во СамГУ, 2001. Ч. 4. 103 с.
- 208. Колесниченко, В.И. Обработка и представление результатов эксперимента / В.И. Колесниченко. Пермь: Изд-во ПГТУ, 2000. 74 с.
- 209. Маркин, Н.С. Основы теории обработки результатов измерений / Н.С. Маркин. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 173 с.
- 210. Постников, В.С. Эмпирическое моделирование / В.С. Постников, С.А. Белова. Пермь: Изд-во ПГТУ, 2002. 45 с.
- 211. Лялькина, Г.Б. Математическая обработка результатов эксперимента: учебное пособие / Г.Б. Лялькина, О.В. Бердышев; под ред. В.А. Трефилова. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. 90 с.
- 212. Kruiniger, H. On the estimation of panel regression models with fixed effects / H. Kruiniger; Department of Economics Queen Mary University of London. London, 2002. 41 p.
- 213. Хальд, А. Математическая статистика с техническими приложениями / А. Хальд. М.: Иностр. лит-ра, 1956. 664 с.
- 214. Дубров, А.М. Многомерные статистические методы / А.М. Дубров, В.С. Мхитарян, Л.И. Трошин. М.: Финансы и статистика, 2003. 352 с.
- 215. Devore, J.L. Modern mathematical statistics with applications / J.L. Devore, K.N. Berk. Springer, 2011. 857 p.

- 216. Медведев, Б.И. К расчету депрессии естественной тяги шахт / Б.И. Медведев // Разработка месторождений полезных ископаемых. Киев: Техника, 1984. Вып. 68. С. 3–7.
- 217. Медведев, Б.И. Естественная тяга глубоких шахт / Б.И. Медведев, А.М. Гущин, В.Л. Лобов. М.: Недра, 1985. 77 с.
- 218. Медведев, И.И. Проветривание калийных и каменносоляных рудников / И.И. Медведев, М.А. Патрушев. – М.: Госгортехиздат, 1963. – 159 с.
- 219. Состояние проветривания шахт Урала / К.Н. Коренной, Г.М. Мокрецов, Н.Н. Коренной, И.С. Панов, С.И. Юдин, В.В. Токмаков // Известия вузов. Горный журнал. 2006. № 4. С. 47–50.
- 220. Николаев, А.В. Анализ теоретической формулы, определяющей величину естественной тяги действующей между воздухоподающим и вентиляционным стволами / А.В. Николаев // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2009. № 10. С. 72–75.
- 221. Обеспечение безопасности и энергоэффективности при проветривании шахт и рудников, использующих систему рециркуляции воздуха / А.В. Николаев, Н.И. Алыменко, М. Чехлар, Ю. Яночко, Д.Н. Алыменко, В.А. Николаев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2017. Т. 16, № 4. С. 370—377. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.4.8.
- 222. Factors defining value and direction of thermal drop between mine shafts and impact of general mine natural draft on ventilation process of underground mining companies / A.V. Nikolaev, N.I. Alymenko, A.A. Kamenskikh, D.N. Alymenko, V.A. Nikolaev, A.I. Petrov // Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2017) [Electronic resource]: proceedings of the Intern. Conf. Tomsk. 27–29 July. 2017 / Tomsk Polytechnic University. Paris Amsterdam Hong Kong: Atlantis Press, 2017. P. 561–566. DOI 10.1088/1755-1315/87/5/052020.
- 223. Николаев, А.В. Метод расчета величины общерудничной естественной тяги / А.В. Николаев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. N S-2-2. С. 12-17.

- 224. Ядарова, О.Н. Система управления вентиляторной установкой на основе доплеровского ультразвукового контроля расхода воздуха: дис. ... канд. техн. наук / О.Н. Ядарова; Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова. Чебоксары, 2017. 152 с.
- 225. Development of an air flow sensor for heating, ventilating, and air conditioning systems based on printed circuit board technology / Th. Glatzl, H. Steiner, F. Kohl, Th. Sauter, F. Keplinger // Sensors and Actuators A: Physical. Vol. 237. P. 1–8.
- 226. Трусов, П.В. Введение в математическое моделирование / П.В. Трусов. М.: Логос, 2005. 440 с.
- 227. McPherson, M.J. Barometric survey of shafts at Baaulbay Mine, Cleveland Potash / M.J. McPherson, G. Robinson // Mine vent. South Africa. 1980. Vol. 33. P. 145–164.
- 228. Hanjalic, K. A Reynolds stress model of turbulence and its application to thin shear flows / K. Hanjalic, B.E. Launder // J. Fluid Mech. -1972. Vol. 52, N_{\odot} 4. P. 609–638.
- 229. Van Ulden. Estimation of Atmospheric Boundary Layer Parameters for Diffusion Applications / Van Ulden, A. Holtslag // J. Clim. Appl. Meteorol. 1985. Vol. 24. P. 1196–1207.
- 230. Lyal'kina G.B. Natural draught and its direction in a mine at the preset confidence coefficient / G.B. Lyal'kina, A.V. Nikolaev // Journal of Mining Science. 2015. Vol. 51, № 2. P. 342–346.
- 231. Алыменко, Н.И. Исследование и разработка методов и средств повышения эффективности и надежности проветривания подземных рудников с большим эквивалентным отверстием (на примере калийных рудников): дис. ... д-ра техн. наук / Н.И. Алыменко; СПб гос. горн. инст. СПб., 1998. 334 с.
- 232. Гидрометеорологическая безопасность и устойчивое развитие России / А.И. Бедрицкий, А.А. Коршунов, Л.А. Хандожко, М.З. Шаймарданов // Право и безопасность. -2007. -№ 1-2. -C. 7-13.

- 233. Tsirkunov, V. Assessment of economic efficiency of the National hydrometeorological system modernization project / V. Tsirkunov, S. Ulatov, A. Korshunov. World Bank Working Paper, 2004.
- 234. Shaimardanov, M.Z. The use of hydrometeorological information in the various economic sectors / M.Z. Shaimardanov, A.A. Korshunov // Conference on the economic benefits of meteorological and hydrological services. Geneva, 1994. WMO/TD. N_{\odot} 630. P. 28–36.
- 235. Результаты математического моделирования смешивания холодного и теплого потоков воздуха в воздухоподающем стволе рудника / Н.И. Алыменко, А.В. Николаев, А.А. Каменских, А.И. Петров // Горное оборудование и электромеханика. 2014. N = 12. C. 31-33.
- 236. Numerical modeling of heat and mass transfer during hot and cool air mixing in a supply shaft in underground mine / N.I. Alymenko, A.A. Kamenskikh, A.V. Nikolaev, A.I. Petrov // Eurasian Mining. -2016. No 2. P. 45–47.
- 237. Шахтная калориферная установка: пат. 133877 Рос. Федерация: МПК E21F1/08; F24H/3/04 / Николаев А.В., Алыменко Н.И., Седунин А.М., Николаев В.А., Файнбург Г.З.; заявитель и патентообладатель ЗАО «ЭНЕРГОСЕР-ВИС». № 2013115777/03 заявл. 08.04.2013; опубл. 27.10.2013, Бюл. № 30.
- 238. Исаченко, В.П. Теплопередача: учебник дл вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
- 239. Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: учеб. пособие для вузов / В.В. Нащокин. 3-е изд., испр. и доп. М.: Высш. школа, 1980. 490 с.
- 240. Янченко, Г.А. Инженерные методы расчета плотности влажного воздуха / Г.А. Янченко, И.В. Кириченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. М., 2012. № 11. С. 159.
- 241. Теплопередача: учеб. пособие для вузов: в 2 ч. Ч. 2: Упражнения и задачи / В.С. Чередниченко, В.А. Синицын, А.И. Алиферов и др.; под. ред. В.С. Чередниченко, А.И. Алиферов. 2-е изд., перераб. и доп. Новосибирск: Издво НГТУ, 2010. 379 с.

- 242. Инфракрасные стеклянные обогреватели Пион Thermo Glass [Электронный ресурс]. URL: http://vamteplo.ru/catalog.18.html (дата обращения: 01.07.2019).
- 243. Методика определения потребности в топливе, электрической энергии и воде при производстве и передаче тепловой энергии и теплоносителей в системах коммунального теплоснабжения: МДК 4-05.2004: утв. Госстроем России 12.08.2003. М.: Госстрой России, 2003. 81 с.
- 244. Расчет теплопроизводительности шахтной калориферной установки, расположенной в калориферном канале, и затрачиваемой на ее работу электроэнергии / А.В. Николаев, Н.И. Алыменко, Г.З. Файнбург, А.М. Седунин, В.А. Николаев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2014. N 4. С. 105—112.
- 245. Шахтная калориферная установка: пат. 142085 Рос. Федерация: МПК E21F1/00; E21F3/00; F24H/3/04 / Николаев А.В., Алыменко Н.И., Седунин А.М., Лялькина Г.Б., Николаев В.А.; заявитель и патентообладатель ЗАО «ЭНЕРГО-СЕРВИС». № 2013150970/03 заявл.15.11.2013; опубл. 20.06.2014, Бюл. № 17.
- 246. Николаев, А.В. Интенсификация теплообмена в шахтной калориферной установке / А.В. Николаев // Горное оборудование и электромеханика. 2013. № 11. C. 10–13.
- 247. Каменских, А.А. Выбор расположения осевых вентиляторов главной вентиляторной установки, обеспечивающих наименьшее аэродинамическое сопротивление вентиляционной сети / А.А. Каменских, Н.И. Алыменко, А.В. Николаев // Горное оборудование и электромеханика. 2014. № 12. С. 23—26.
- 248. Шахтная калориферная установка: пат. 2630838 Рос. Федерация: МПК E21F1/08, E21F3/00 / Николаев А.В., Максимов П.В., Алыменко Н.И., Фетисов К.В., Николаев В.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». № 2016135150 заявл. 29.08.2016; опубл. 13.09.2017, Бюл. № 26.
- 249. Алыменко, Н.И. Влияние естественной тяги воздухоподающих стволов на проветривание калийных рудников / Н.И. Алыменко, А.А. Норин,

- В.В. Минин // Вентиляция шахт и рудников. Интенсификация воздухообмена и пылегазообразование в горных выработках. Л.: Изд-во ЛГИ, 1989. С. 54–57.
- 250. Казаков, Б.П. Общие принципы работы безвентиляторных систем отопления шахтных стволов / Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин // Горная механика Солигорский институт проблем ресурсосбережения. 2001. № 1—2. С. 35—39.
- 251. Шахтная калориферная установка: пат. 122698 Рос Федерация: МПК E21F1/08 / Николаев А.В., Алыменко Н.И., Николаев В.А., Земсков А.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». № 2012129273/03; заявл. 10.07.2012; опубл. 10.12.2012.
- 252. Николаев, А.В. Расчет воздухонагревательной калориферной установки, расположенной в стене надшахтного здания / А.В. Николаев, М.Ю. Постникова, Н.Н. Мохирев // Научные исследования и инновации. 2010. T.4, № 1. C.139-141.
- 253. Левин, Л.Ю. Тепломассообмен в энергосберегающих системах обогрева шахтных стволов рудников / Л.Ю. Левин, А.Г. Исаевич // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2004. № 5. С. 40–44.
- 254. Шахтная калориферная установка: пат. 141759 Рос. Федерация: МПК E21F1/08; E21F3/00 // Николаев А.В., Алыменко Н.И., Николаев В.А., Седунин А.М.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». № 2013149747/03; заявл.06.11.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.
- 255. Алыменко, Н.И. Об эффективности работы шахтной калориферной установки, расположенной по периметру надшахтного здания / Н.И. Алыменко, А.В. Николаев, В.А. Николаев, А.А. Каменских // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2016. Т. 15, № 18. С. 91–98.
- 256. Мохирев, Н.Н. Расчеты при проектировании вентиляции шахт / Н.Н. Мохирев, А.С. Попов. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. 317 с.

- 257. Теплообменные аппараты холодильных установок / Г.Н. Данилова, С.Н. Богданов, О.П. Иванов [и др.]. Л.: Машиностроение, 1973. 328 с.
- 258. Баркалов, Б.В. Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях / Б.В. Баркалов, Е.Е. Карпис. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1982. 312 с.
- 259. Способ проветривания подземного горнодобывающего предприятия: пат. 2601342 Рос. Федерация: МПК E21F1/08; E21F3/00 // Николаев А.В., Алыменко Н.И.. Николаев В.А., Каменских А.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». № 2015140487/03; заявл. 22.09.2015; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 31.
- 260. The results of air treatment process modeling at the location of the air curtain in the air suppliers and ventilation shafts / A. Nikolaev, N. Alymenko, A. Kamenskih, V. Nikolaev // E3S Web of Conferences. Vol. 15: The 1st Scientific Practical Conference «International Innovative Mining Symposium (in memory of Prof. Vladimir Pronoza)»: proceedings. 2017. 7 p.
- 261. Каменских, А.А. Разработка методов контроля и снижения поверхностных утечек воздуха на рудниках: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Горн. ин-т. УрО РАН. Пермь, 2011. 19 с.
- 262. Движение воздуха в воздухоподающем и вентиляционном стволах рудника / Н.И. Алыменко, А.А. Каменских, А.В. Николаев, А.И. Петров // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования: матер. І междунар. науч.-практ. конф., 27–30 октября 2014 г. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2014. С. 122–125.
- 263. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов [и др.]. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.
- 264. Результаты моделирования процесса проветривания рудника при расположении воздушной завесы в воздухоподающем и вентиляционном стволах / А.В. Николаев, Н.И. Алыменко, А.А. Каменских, Ш.К. Фет,

- В.А. Николаев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2017. T. 16, № 3. C. 291–300.
- 265. Николаев, А.В. Сравнительный анализ потребления тепло- и энергоресурсов шахтными калориферными установками / А.В. Николаев, М.Ю. Постникова, Н.Н. Мохирев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2010. № 5. С. 95—102.
- 266. Кривошапко, А.В. Сравнительный анализ использования для подогрева шахтного воздуха воздухонагревательных установок (ВНУ) ОАО «Кемеровский экспериментальный завод средств безопасности» (ОАО «КЭЗСБ») и традиционных схем «котельная-калорифер» / А.В. Кривошапко, В.М. Кондаков, А.В. Кондаков // Уголь. 2007. № 7. С. 63—64.
- 267. Заломихин, В.А. Подогрев воздуха котлов обратной сетевой водой, включенной на теплофикационный турбоагрегат / В.А. Заломихин, Б.Ф. Калугин // Известия Томского политехнического университета. -2008. Т. 313, № 4. С. 45-48.
- 268. Белоусов, В.И. Управление температурой подаваемого в рудник воздуха / В.И. Белоусов, Р.Г. Шваб, А.Л. Батяновский // Горный журнал. 2014. № 2. С. 45–47.
- 269. Анализ работы системы воздухоподготовки на руднике БКПРУ-2 / А.В. Николаев, Н.И. Алыменко, А.М. Седунин, Г.З. Файнбург, В.А. Николаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 2. С. 255–265.
- 270. Фортов, В.Е. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России / В.Е. Фортов, О.С. Попель // Теплоэнергетика. 2014. N = 6. C. 4.
- 271. Попель, О.С. Перспективные направления использования возобновляемых источников энергии в централизованной и автономной энергетике / О.С. Попель, Б.Ф. Реутов, А.П. Антропов // Теплоэнергетика. − 2010. − № 11. − С. 2–11.

- 272. Demirbas, A. Calculation of high heating values of biomass fuels / A. Demirbas // Fuel. 1997. № 76. P. 431–434.
- 273. Fixed-bed pyrolysis of cotton stalk for liquid and solid products / A.E. Putun, N. Ozbay, E.P. Onal, E. Putun // Fuel Process Technol. 2005. № 86. P. 1207–1219.
- 274. Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics / K. Raveendran, G. Anuraddha, C. Kartic, K. Khilar // Fuel. − 1995. − № 74. − P. 1812–1822.
- 275. Маркин, А.В. Ветроэнергетическая установка нового поколения закрытая ветровая турбина / А.В. Маркин // Горный журнал. 2015. № 3. С. 88—90.
- 276. Гусак, С.И. Энергия ветра: вчера, сегодня, завтра / С.И. Гусак // Альтернативная энергетика и экология. 2009. № 7 (75). С. 65–68.
- 277. Алексеенко, С.В. Нетрадиционная энергетика и энергоресурсосбережение в России / С.В. Алексеенко // Энергосбережение. 2008. № 1. С. 68–74.
- 278. Hall, A. Geothermal energy recovery from underground mines / A. Hall, J.A. Scott, H. Shang // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. № 15. P. 916–924.
- 279. Numerical analysis of thermal response tests with a groundwater flow and heat transfer model / J. Raymond, R. Therrien, L. Gosselin, R. Lefebvre // Renewable Energy. -2011. N = 36. P. 315-324.
- 280. О возможности использования тепла глубинных пород земли для электро- и теплоснабжения обособленных потребителей / В.А. Рыженков, А.В. Мартынов, Н.Е. Кутько, Д.В. Никифорова // Энергосбережение и водоподготовка. 2009. № 1 (57). С. 12–16.
- 281. Bejan, A. Thermal Design and Optimization / A. Bejan, G. Tsatsaronics, M. Morgan. New York: J. Wiley. 1996. 530 p.
- 282. Липатников, С.Н. Утилизация ВЭР промпредприятия в условиях ограниченного потребления теплоты на хозяйственно-бытовые нужды / С.Н. Липатников // Промышленная энергетика. 2003. № 7. С. 9—11.

- 283. Воронов, М.Е. Состояние и перспективы энергосбережения в электроэнергетике / М.Е. Воронов // Энергетик. 2002. № 11. С. 12–14.
- 284. Рыбин, А.А. Применение тепловых насосов в целях утилизации теплоты оборотной воды и охраны окружающей среды / А.А. Рыбин, Д.Г. Закиров // Уголь. -1998. -№ 3. С. 19–21.
- 285. Стогней, В.Г. Экономия теплоэнергетических ресурсов на промышленных предприятиях / В.Г. Стогней, А.Т. Крук. М.: Энергоатомиздат, 1991. 112 с.
- 286. Система подогрева воды, подаваемой потребителю: пат. 2557156 Рос. Федерация: МПК F24D 19/10 / Николаев А.В., Цаплин А.И., Алыменко Н.И., Николаев В.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». № 2014118663/06 заявл.07.05.2014; опубл. 20.07.2015, Бюл. № 20.
- 287. Fujii, T. Laminar film: wise condensation of flowing vapour on a horizontal cylinder / T. Fujii, H. Uehara, Ch. Kurata // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1972. Vol. 15, № 2. P. 235–246.
- 288. Кулиниченко, В.Р. Справочник по теплообменным расчетам / В.Р. Кулиниченко. К.: Тэхника, 1990. 165 с.
- 289. Предотвращение обледенения воздухоподающих выработок подземных рудников / В.И. Демин, Ю.Л. Зюзин, А.В. Ковалев, С.С. Пугачев // Горный журнал. -2009. -№ 9. C. 83-85.
- 290. Мохирев, Н.Н. Обоснование подземного размещения главной вентиляторной установки в шахте Дехканабадского завода калийных удобрений / Н.Н. Мохирев, А.А. Романовский, Н.С. Кошурников // Технология ведения горных работ и производство техники для горнодобывающей промышленности: сборник трудов / Западно-Уральский машиностроительный концерн. 2009. Вып. 4. С. 78—79.
- 291. Ejector fan installations used in mines of Russia / N.I. Alymenko, A.V. Nikolaev, A.A.Kamenskikh, A.I. Petrov // Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2017) [Electronic resource]: proceedings of the Intern. Conf., Tomsk, 27–29

- July, 2017 / Tomsk Polytechnic University. Paris Amsterdam Hong Kong: Atlantis Press, 2017. P. 54–60.
- 292. Николаев, А.В. Мероприятия, повышающие эффективность проветривания панели калийного рудника при прямом порядке отработки / А.В. Николаев // Молодой ученый. 2013. № 3. С. 89—91.
- 293. Николаев, А.В. Зависимость потребления электроэнергии главной вентиляторной установки от способа проветривания добычных участков калийных рудников / А.В. Николаев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2011. N 1. C. 143—151.
- 294. Способ проветривания выемочного участка при обратном порядке отработки: пат. 2529459 Рос. Федерация: МПК E21F1/00 / Николаев А.В., Алыменко Н.И., Земсков А.Н., Николаев В.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». № 2013132295/03 заявл.11.07.2013; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27.
- 295. Способ проветривания выемочного участка при обратном порядке отработки полезного ископаемого, расположенного по падению пласта: пат. 2569647 Рос. Федерация: МПК E21F1/00 / Николаев А.В., Алыменко Н.И., Николаев В.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». № 2014146542/03 заявл.19.11.2014; опубл. 27.11.2015, Бюл. № 33.
- 296. Шахтная вентиляционная перемычка: пат. 116575 Рос. Федерация: МПК Е21F17/107 / Николаев А.В., Алыменко Н.И., Николаев В.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». № 201200720/03 заявл.11.01.2012; опубл.27.05.2012, Бюл. № 15.
- 297. Осипов, С.Н. Вентиляция шахт при подземных пожарах / С.Н. Осипов, В.М. Жадан. М: Недра, 1973. 152 с.

- 298. Игишев, В.Г. Современное состояние проблемы борьбы с эндогенными пожарами в шахтах Кузбасса / В.Г. Игишев, С.А. Син // Уголь. 2012. № 7. C. 36.
- 299. Griffin, R. In-Mine Evaluation of Underground Fire and Smoke Detectors / R.Griffin. Morgantown WV: University of West Virginia, 1978. 18 p.
- 300. Осипов С.Н. Динамика пожара в горизонтальной горной выработке / С.Н. Осипов, В.М. Жадан // Уголь Украины. 1967. № 9. С. 15—17.
- 301. Hardcastle, S.G. Studies into the wider application of controlled recirculation in Mine Ventilation / S.G. Hardcastle, R.J. Kolada, A.W. Stokes // The mining Engineering (Gr. Brit.). − 1984. − Vol. 143, № 273. − P. 591–598.
- 302. Impact of using auxiliary fans on coal mine ventilation efficiency and cost / K.G. Wallace, M.J. McPherson, D.J. Brunner, F.N. Kissel // Bur. mines US Dep. Inter. -1990. N 9307. P. 1-8.
- 303. Николаев, А.В. Мероприятия, предназначенные для защиты горнорабочих от отравления угарным газом в случае возникновения пожара в конвейерном штреке блока калийного рудника / А.В. Николаев, Н.И. Алыменко, В.А. Николаев // Рудник будущего. — 2012. — № 2. — С. 67—70.
- 304. Акт № 05/24-17-30 от 16.03.2001 г. О результатах исследований вероятности возгорания резинотканевой ленты на приводных станциях конвейеров / утв. генеральным директором ОАО «Уралкалий».
- 305. Акт № 05/24-24-84 от 10.08.2000 г. О результатах исследований вероятности возгорания резинотканевой ленты на натяжных станциях конвейеров / утв. генеральным директором ОАО «Уралкалий».
- 306. Николаев, А.В. Результаты моделирования аварийной ситуации в блоках, отрабатывающих наклонные пласты / А.В. Николаев, Н.И. Алыменко // Проблемы обеспечения безопасности в промышленности, строительстве и на транспорте: материалы междунар. науч. техн. конф. Пермь, 2010. С. 107–115.
- 307. РД 03-423-01. Нормы безопасности на конвейерные ленты для опасных производственных объектов и методы испытаний. М.: Госгортехнадзор Российской Федерации, 2001. 45 с.

- 308. Мохирев, Н.Н. Моделирование аварийной ситуации в шахте / Н.Н. Мохирев, А.Н. Губайдуллина // Материалы ХХХ юбилейной науч.-техн. конф., посвященной 50-летию ПГТУ (32-й науч.-техн. конф. горно-нефтяного факультета). Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2003. С. 12–14.
- 309. Балтайтис, В.Я. Метод определения некоторых параметров подземного пожара по составу пожарных газов / В.Я. Балтайтис, Ю.М. Маркович // Известия вузов. Горный журнал. 1967. № 9.
- 310. BE3A: каталог продукции. Кондиционер центральный каркасно-панельный. Вып. 1. Редакция № 10 от 01.04.2009.
- 311. Разработка исходных данных для проектной документации на строительство Усольского калийного комбината. Исходные данные для разработки проектной документации на проветривание рудника. — Отчет о выполненной услуге / отв. исполнитель Н.Н. Мохирев. — Пермь, 2009. — 52 с.
- 312. Зенкевич, О.К. Метод конечных элементов в технике / О.К. Зенкевич. М.: Мир, 1975. 538 с.
- 313. Строительная механика. Стержневые системы / А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Б.Я. Лащенинков, Н.Н. Шапошников. М.: Стройиздат, 1981. 512 с.
- 314. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. М., 1966. 636 с.
- 315. Филин, А.П. Элементы теории оболочек / А.П. Филин. Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1975.-256 с.
- 316. Максимов, П.В. Расчет каркасных деревянных конструкций с применением МКЭ / П.В. Максимов, А.И. Волков // Вестник ПНИПУ. Механика. 2012. № 1. C. 73–92.
- 317. Максимов, П.В. О некоторых подходах к построению моделей вынужденного движения микроакселерометра / П.В. Максимов // Вестник ПГТУ. Механика. Пермь, 2011. № 1. С. 55–71.
- 318. ГОСТ 1583-93. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия. М., 1993. 23 с.

- 319. ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. – М., 1997. – 32 с.
- 320. Методика проведения испытаний экспериментального образца шахтной вентиляционной перемычки на руднике БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий». Пермь Березники, 2019. 21 с.
- 321. СанПиН 2.2.4.548-96. 2.2.4. Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы: утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 01.10.1996 № 21. М., 1996. 12 с.
- 322. Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности: Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности Серия 08. Вып. 19. М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. 288 с.
- 323. Мохирев, Н.Н. Испытание системы осушения воздуха в руднике ОАО «Уралкалий» / Н.Н. Мохирев, Б.П. Казаков, В.А. Стукалов // Горный журнал. 1998. № 6. С. 69—70.
- 324. Система проветривания неглубокого рудника: пат. 140553 Рос. Федерация: МПК E21F1/00 / Николаев А.В., Алыменко Н.И., Файнбург Г.З., Николаев В.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». № 2013154241/03; заявл. 05.12.2013; опубл. 10.05.2014, Бюл. № 13.
- 325. Levin, L.Yu. Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations / L.Yu. Levin, M.A. Semin, A.V. Zaitsev // Journal of Mining Science. − 2014. − Vol. 50, № 2. − P. 371–378.
- 326. Kazakov, B.P. Stability of natural ventilation mode after main fan stoppage / B.P. Kazakov, A.V. Shalimov, M.A. Semin // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 86. P. 288–293.

- 327. Николаев, А.В. Вариант применения системы кондиционирования воздуха в неглубоких подземных горнодобывающих предприятиях / А.В. Николаев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2014. № 13. С. 93–98.
- 328. Краснов, Ю.С. Системы вентиляции и кондиционирования / Ю.С. Краснов, А.П. Борисоглебский, А.В. Антипов. М.: Термокул, 2004. 373 с.
- 329. Shadrina, A. Exploration and determination of the principles of rotary-percussive underground slimhole drilling / A. Shadrina, L. Saruev // International Journal of Mining Science and Technology. 2014. Vol. 24 (2). P. 245–249.
- 330. Установка для захисту робітників від перегрівання: пат. 70653 Україна: МПК Е21F3/00; Е21F11/00 // Муравейник В.І., Алексєенко С.О., Шай-хлісламова І.А., Король В.І.; заявитель и патентообладатель Національний гірничий університет. опубл. 25.06.2007, Бюл. № 9.
- 331. Пристрій для профілактики теплових уражень гірників: пат. 27730 Україна: МПК Е21F 5/00 // Брюханов О.М., Яковенко А.К., Мартинов А.А.; заявитель и патентообладатель Державний Макіївський науково-дослідний інститут з безпеки робіт у гірничій промисловості. опубл. 12.11.2007, Бюл. № 19.
- 332. Пристрій для профілактики теплових уражень гірників: пат. 36085 Україна: МПК Е21F 5/00 // Брюханов О.М., Яковенко А.К., Мартинов А.А., Подлужний О.Г.; заявитель и патентообладатель Державний Макіївський науково-дослідний інститут з безпеки робіт у гірничій промисловості. опубл. 10.10.2008, Бюл. № 19.
- 333. Гоголин, А.А. Осушение воздуха холодильными машинами / А.А. Гоголин. М.: Госторгиздат, 1962. 103 с.
- 334. Гоголин, А.А. Кондиционирование воздуха в мясной проышленности / А.А. Гоголин. М.: Пищевая промышленность, 1966. 239 с.
- 335. Соколов, Е.Я. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения / Е.Я. Соколов, В.М. Бродянский. М.: Энергия, 1968. 336 с.

- 336. Николаев, А.В. Система кондиционирования шахтного воздуха комбинированного поверхностно-подземного типа / А.В. Николаев // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 3. С. 40–45.
- 337. Мохирев, Н.Н. Использование природных источников холода для осущения воздуха в шахте / Н.Н. Мохирев // Технология ведения горных работ и производство машин и механизмов для горнодобывающей промышленности: сборник трудов / Западно-Уральский машиностроительный концерн; ООО «ЗУМК-Инжиниринг». Пермь, 2007. Вып. 3. С. 82—86.
- 338. Кокорин, О.Я. Установки кондиционирования воздуха. Основы расчета и проектирования / О.Я. Кокорин. М., Изд-во «Машиностроение», 1971. 344 с.
- 339. Карпис, Е.Е. Тепловой и аэродинамический расчет поверхностных воздухоохладителей, питаемых холодной водой / Е.Е. Карпис. М.: Изд-во БПК и ТП НИИ сантехники, 1961. 54 с.
- 340. Способ проветривания подземного горнодобывающего предприятия: пат. 2566545 Рос. Федерация: МПК E21F1/08 / Николаев А.В., Алыменко Н.И., Николаев В.А., Якимова В.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». № 2014138327/03 заявл.22.09.2014; опубл. 27.10.2015, Бюл. № 30.
- 341. Система проветривания нефтешахты: пат. 2582145 Рос. Федерация: МПК Е21F1/08 / Николаев А.В., Алыменко Н.И., Файнбург Г.З., Николаев В.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». № 2015112488/03 заявл.06.04.2015; опубл. 20.04.2016, Бюл. № 11.
- 342. Система проветривания уклонного блока нефтешахты: пат. 2648790 Рос. Федерация: МПК E21F1/08 / Николаев А.В., Алыменко Н.И., Николаев В.А., Рыбин А.А., Закиров Д.Г.; заявитель и патентообладатель ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук». № 2017104189; заявл.08.02.2017; опубл. 28.03.2018, Бюл. № 10.

- 343. Система проветривания уклонного блока нефтешахты: пат. 2645690 Рос. Федерация: МПК E21F17/18 / Николаев А.В., Николаев В.А., Алыменко Н.И., Вавулин А.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». № 2016147589; заявл.05.12.2016; опубл. 27.02.2018, Бюл. № 6.
- 344. Система проветривания уклонного блока нефтешахты: пат. 2652769 Рос. Федерация: МПК Е21F1/08 / Николаев А.В., Николаев В.А., Алыменко Н.И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». № 2017121093; заявл.15.06.2017; опубл. 28.04.2018, Бюл. № 13.
- 345. Казаков, Б.П. Теория и практика прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников / Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, А.В. Шалимов. М.: Недра, 2016. 244 с.
- 346. Рудаков, М.Л. О возможности нормализации температуры воздуха в буровых галереях нефтяных шахт / М.Л. Рудаков, М.А. Коробицына // Безопасность труда в промышленности. 2019. N = 8. C. 66-71.
- 347. Теплоизоляционный трубопровод: пат. 171453 Рос. Федерация: МПК F16L59/06 / Николаев А.В., Николаев В.А., Алыменко Н.И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». № 2016138626 заявл. 29.09.2016; опубл. 01.06.2017, Бюл. № 16.