

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
(Н И У « Б е л Г У »)

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

КАФЕДРА ОБЩЕЙ МАТЕМАТИКИ

**ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НОРМАЛИЗАЦИИ
ТЕПЛОВЫХ УСЛОВИЙ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ**

Магистерская диссертация
обучающегося по направлению подготовки 01.04.01 Математика
очной формы обучения, группы 07001534
Евтеева Станислава Олеговича

Научный руководитель
Доктор технических наук,
профессор
Аверин Г.В.

Рецензент
Заместитель директора по
общим вопросам
К.т.н., доцент
Маматов Е.М.

БЕЛГОРОД 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	9
1.1. Анализ закономерностей формирования тепловых условий в горных выработках и методов прогноза тепловлажностных параметров рудничного воздуха.....	9
1.2. Опыт применения и направления развития промышленных систем охлаждения рудничного воздуха в мировой практике.....	17
1.3. IT системы прогноза тепловых условий в шахтах.....	29
1.4. Выводы и задачи исследований.....	34
2. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА МЕЖДУ ШАХТНЫМ ВОЗДУХОМ И ГОРНОЙ СРЕДОЙ.....	36
2.1. Принципы построения, структурная схема и функции компьютерной модели.....	36
2.2. Разработка компьютерной модели для описания процессов теплообмена между шахтным воздухом и горной средой.....	40
2.3. Выводы по разделу	50
3. АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕПЛОМАССООБМЕНА НА ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКАХ ПРИ КОНДИЦИОНИРОВАНИИ РУДНИЧНОГО ВОЗДУХА.....	52
3.1. Методика и характеристика объектов исследования.....	52
3.2. Вычислительные эксперименты и статистический анализ шахтных экспериментальных данных	55
3.3. Выводы по разделу	62
4. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СРЕДСТВ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ НОРМАЛИЗАЦИИ МИКРОКЛИМАТА НА ВЫЕМОЧНЫХ	

	4
УЧАСТКАХ ГЛУБОКИХ ШАХТ.....	63
4.1. Определение исходных данных и проведение вычислительных экспериментов.....	63
4.2. Выводы по разделу.....	66
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	67
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	69

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Обеспечение безопасных условий труда шахтёров, охрана окружающей природной среды и повышение безопасности техники – одно из важнейших направлений развития горнодобывающей промышленности.

Возрастающая глубина разработки, рост энерговооруженности забоев, а также интенсификация горных работ обусловили формирование тяжелых климатических условий труда горнорабочих на многих шахтах и рудниках Украины, России, Германии, ЮАР и других стран.

Например, более 50 шахт украинской части Донецкого бассейна, в том числе около 30 шахт глубиной более 1000 м, эксплуатируются с нарушением температурных условий труда. По состоянию на 2005 год температура воздуха превышала допустимую Правилами безопасности в 130 очистных и 230 подготовительных забоях. В шахтах глубиной 1100 – 1300 м (им. А.А. Скочинского, им. М.И.Калинина, «Шахтерская - Глубокая», «Прогресс», им. Ф.Э.Дзержинского и др.) все действующие забои относятся к высокотемпературным. Есть случаи когда температура воздуха достигает 35-37 °С в очистных и 36-38 °С в подготовительных выработках. В целом численность работающих в высокотемпературных забоях превышает 50 тыс. человек.

Работы по обработке приточного воздуха в глубоких шахтах проводятся с 1959 г. К концу 80-х годов на шахтах бассейна было введено в эксплуатацию 30 поверхностных установок охлаждения рудничного воздуха и более 250 передвижных кондиционеров, а установленная холодильная мощность достигла 150 МВт холода. К этому моменту около половины добывающей промышленности была укомплектована оборудованием для обработки воздуха подаваемого в забой.

В начале 90-х годов развитие кондиционирования рудничного воздуха на шахтах приостановилось, а потенциал установленной холодильной

техники стал резко сокращаться. Это было обусловлено тяжелым экономическим положением шахт и запрещением применения хладагента R12. По состоянию на 2004 г. угольная отрасль потеряла 95% установленной холодильной мощности, в том числе, основную часть по причине экологической безопасности, в связи с запретом Монреальским протоколом производства и применения холодильного агента R12. Вся холодильная техника, работающая на фреоне R12, была выведена из эксплуатации без восстановления утраченных мощностей. В работоспособном состоянии сохранилась техника суммарной мощностью около 4 МВт холода, в качестве рабочего вещества у которой используется холодильный агент R22.

Для повышения эффективности нормализации тепловых условий, снижения энергетических затрат и выполнения требований экологической и промышленной безопасности в странах с развитой горнодобывающей промышленностью в последнее время внедряются установки получения льда для целей кондиционирования шахтного воздуха, использующие в качестве рабочих веществ альтернативные хладагенты из ряда фреонов и аммиак. Научные и практические результаты в этой области связаны с работами И. Фосса (Германия), Т. Ширы (ЮАР), Ю.А. Цейтлина (Украина) и других ученых.

Сегодня мировой опыт обработки рудничного воздуха свидетельствует о необходимости создания эффективных и безопасных способов охлаждения и подогрева воздуха для глубоких шахт и рудников, направленных на существенное снижение энергетических затрат, повышение эффективности и промышленной и экологической безопасности данного технологического процесса. С этой целью необходимо иметь возможность прогнозирования микроклимата в горных выработках, при охлаждении и нагревании рудничного воздуха. Поэтому тема магистерской работы является актуальной и имеет важное значение, т.к. связана с развитием методов прогноза и способов регулирования теплового режима глубоких шахт.

Цель исследования. Целью работы является совершенствование методов прогноза теплового режима горных выработок при искусственной обработке рудничного воздуха и разработка для обеспечения регламентируемых условий труда шахтеров, повышение безопасности применения техники кондиционирования воздуха и снижение воздействий на окружающую природную среду.

Задачи исследования –

1. Обобщить существующие закономерности формирования процессов тепломассообмена в горных выработках глубоких шахт и разработать компьютерные модели прогноза тепловлажностных параметров воздуха и определения необходимой для нормализации тепловых условий холодопроизводительности средств охлаждения.

2. Исследовать тепловые условия на выемочных участках при искусственном охлаждении воздуха и провести сравнительный анализ закономерностей формирования теплового режима в горных выработках с охлаждением и без охлаждения воздуха на основе статистического анализа шахтных экспериментальных данных.

3. Выявить особенности технологических процессов охлаждения рудничного воздуха на горнодобывающих предприятиях, провести анализ параметров и определить исходные данные для проведения вычислительных экспериментов.

4. Провести вычислительные эксперименты на основе компьютерных моделей и определить параметры средств искусственного охлаждения рудничного воздуха.

Объект исследования – тепловой режим глубоких шахт и способы его нормализации.

Предмет исследования – комплексные способы нормализации тепловых условий в глубоких шахтах и рудниках.

Методы исследований – систематизация и анализ научно-патентной литературы, теплоэнергетический анализ существующих технологий

вентиляций и кондиционирования рудничного воздуха, обобщение и статистический анализ шахтных данных, математическое и имитационное моделирование, разработка компьютерных моделей и проведение вычислительных экспериментов, поиск и проектирование научно-обоснованных и целесообразных технических решений.

Научные положения, выносимые на защиту:

— компьютерная модель прогноза теплового режима горных выработок при обработке рудничного воздуха, основанная на применении технологий визуального объектно-ориентированного моделирования и компьютерного проектирования сложных производственных объектов в графической среде Simulink;

Научная новизна результатов работы заключается в следующем.

На основе обобщения закономерностей процессов тепломассообмена в глубоких шахтах разработана компьютерная модель прогноза теплового режима горных выработок при искусственном охлаждении/подогреве воздуха. Модель отличается использованием технологии визуального моделирования, позволяющей применять для описания процессов настраиваемые блоки и функциональные схемы графической среды Simulink. Впервые построены и отлажены компьютерные модели, характеризующие процессы тепломассообмена на выемочных участках глубоких шахт, отличающиеся точностью и достоверностью при описании процессов тепломассообмена и представленные в виде графической библиотеки. Предложенная технология моделирования позволяет эффективно строить модели сложных физических систем вида “производственная среда – техника нормализации микроклимата” и проводить вычислительный эксперимент на виртуальном стенде, что открывает ряд новых возможностей в исследовании процессов тепломассообмена на выемочных участках глубоких шахт.

Практическое значение полученных результатов заключается в:

- разработке метода прогноза теплового режима горных выработок на базе технологии и программных средств визуального моделирования;

- создании в среде Simulink библиотеки компьютерных моделей в виде графических объектов выемочных участков глубоких шахт, позволяющих применить методику визуального компьютерного проектирования сложных производственных систем при прогнозе теплового режима;

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованных источников из 22 наименований и изложена на 70 страницах машинописного текста, содержит 19 рисунков, 4 таблиц.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Анализ закономерностей формирования тепловых условий в горных выработках и методов прогноза тепловлажностных параметров рудничного воздуха

В угольной отрасли России по данным на 2011 год работало 85 шахт и 114 разрезов. При подземных горных работах, для нормализации условий труда шахтеров необходимо подавать атмосферный воздух определенных физических параметров. Параметры приточного воздуха нормируются требованиями Правил безопасности и Санитарных норм. В настоящее время десятки шахт России имеют тепловые условия в забоях не соответствующие нормам. На ряде шахт температура воздуха в забоях достигает 35-38°C. На шахтах Крайнего Севера, где работы ведутся в условиях многолетней мерзлоты, температура воздуха на действующих горизонтах круглогодично имеет отрицательные значения. На ряде рудников Крайнего Севера в забоях на разных горизонтах имеет место как отрицательная, так и положительная температура, и, следовательно, рабочие основных профессий в зависимости от производственных заданий могут подвергаться в течение недели воздействию различных параметров микроклимата.

Перспектива развития горнодобывающей промышленности будет происходить, в основном, за счет освоение запасов на больших глубинах. В настоящее время 25 шахт (технических единиц) ведут горные работы на глубине более 1000 м. Большинство этих шахт являются рентабельными и имеют хорошие перспективы для развития горных работ.

Нормативные документы содержат данные о параметрах микроклимата на рабочих местах для безопасного проведения работ в шахтах. При нарушении правил производства горных работ надзорными органами могут быть даны рекомендации для приостановки производства выработки. Отличие параметров микроклимата, от оптимальных, снижает

производительность труда рабочих, приводит к небезопасности производства работ, отрицательно влияет на здоровье шахтеров и как следствие, влияет на продолжительность жизни. Увеличение глубины шахты требует модернизации и усовершенствования инженерных систем, которые не всегда успевают за глубиной выработки. Как следствие повышение температуры на рабочих местах и прочих отклонениях в параметрах воздуха. Настает острая необходимость в увеличениях изысканий в этом направлении.

Параметры воздуха обеспечивают на поверхности непосредственно перед подачей в шахт. Применяя охлаждение рудничного воздуха, возможно снизить температуру воздуха непосредственно на рабочем месте. Но подавая воздух слишком низких температур, есть вероятность вызвать конденсацию влаги на механизмах и агрегатах и даже обледенение их, что приведет к износу или аварии.

Если же выработки проводят в условиях вечной мерзлоты подаваемый воздух необходимо подогревать, однако температура приточного воздуха не должна вызвать таяние пород горного массива.

Таким образом создание микроклимата рабочих мест в горных выработках требует от специалистов горняков индивидуального подхода к каждой конкретной шахте, разрезу, тщательной проработки всех возможных вариантов организации систем для нормализации микроклимата.

Существует огромное количество литературы, посвященной проблемам вентиляции и кондиционирования шахт. Авторами основных работ в данном вопросе можно выделить Щербан А. Н., Кремнев О.А., Журавленко В.Я., Дядькин Ю.Д., Цейтлин Ю.А., Черняк В.П., Воропаев А.Ф., Медведев Б.И., специалисты научно-исследовательских институтов МакНИИ, ВостНИИ, ИТТФ и НАН Украины, проектных институтов Московского горного университета и многих других.

Прогноз тепловых условий в шахте начинают с уравнения теплового баланса.

$$G \cdot di = g \cdot dy + \sum g_m \cdot dy \pm 9,816 \cdot \sin \varphi \cdot dy \quad (1.1)$$

где $g, \sum g_m$ - соответственно удельные тепlopоступления от горного массива и местных источников тепла; i – энтальпия воздуха; G – весовой расход воздуха в горной выработке, φ – угол падения выработки, y – координата.

При расчете прогноза тепловых условий в горных выработках, пользуются Единой методикой прогнозирования температурных условий в угольных шахтах, которая была разработана в конце 70-х годов. Начиная с 90-х годов, многими специализированными институтами, проводились исследования, для разработки новых методик, но на практике они применены не были. Для расчета энтальпии влажного воздуха используем нелинейное уравнение:

$$i = c_p \cdot t + (r + 1,927 \cdot t) \cdot x. \quad (1.2)$$

В уравнении (1.2): c_p – удельная теплоемкость сухого воздуха, $c_p = 1,005 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^\circ\text{C}}$; r – удельная теплота испарения воды, $r = 2500 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; t, x – температура и влагосодержание влажного воздуха, соответственно. Линеаризовать уравнение (1.2) через температуру(t) и относительную влажность(φ) необходимо используя общепринятые методы.

После преобразований, уравнения (1.1) и (1.2) линеаризуются и решаются аналитически. В большинстве работ применяется линейный закон изменения относительной влажности по длине горной выработки, что не совсем соответствует фактическому изменению.

Относительная влажность является выраженной нелинейной величиной, поэтому гипотеза о линейности влажности по длине горной выработки в определенной степени приближенна, особенно для начальных участков выработки. Изменение влагосодержания в большой степени отвечает этому условию, однако соответствующие линеаризованные уравнения теплового баланса вида (1.1) получаются достаточно сложными.

В основу определения теплопритоков от горного массива положена теория нестационарного теплообмена, согласно которой удельный тепловой поток, поступающий в выработку пропорционален коэффициенту нестационарного теплообмена (k_τ) и разности температур пород (t_p) и воздуха (t)

$$g = k_\tau(t_p - t). \quad (1.3)$$

Величина k_τ зависит от времени существования выработки и определяется на основе упрощенных аналитических выражений.

Таким образом, методики прогноза тепловых условий основаны на уравнении теплового баланса, задании тех или иных функций, характеризующих изменение влажностных параметров воздуха по длине горной выработки, и прогнозных уравнений, определяющих общее количество тепла, поступающего в выработку от горного массива и местных источников тепла. Предложенные для практического применения методики отличаются подходом стремящимся учесть как можно больше факторов, влияющих на тепловые условия в горных выработках, многие из которых статистически трудно определимы.

В 90-х годах появились работы, в которых при прогнозе климатических условий используются более глубокие закономерности, установленные на базе натурных тепловых съемок и характеризующие тепловлажностные условия в горных выработках. Отличительной особенностью принятых подходов являлось использование системы уравнений теплового и массового баланса для горной выработки и нескольких эмпирических уравнений, полученных на основе статистической обработки шахтных данных. Подобные подходы позволяют получить решения исходной нелинейной системы дифференциальных уравнений.

За последние годы развитие вычислительной техники и математического обеспечения ЭВМ позволяет применить новые методы в

описании процессов формирования тепловлажностных условий в горных выработках.

Например, для моделирования процессов тепломассообмена может быть построена компьютерная модель изменения тепловлажностных параметров вентиляционной струи в горных выработках как при охлаждении, так и без охлаждения воздуха. В этом плане использование методов визуального объектно-ориентированного моделирования динамических систем, например, системы Simulink пакета Matlab или системы Model Vision Studium (MVS), открывает большие возможности в области прогноза микроклимата в горных выработках. Указанная технология компьютерного моделирования позволяет работать с моделями физических систем любой сложности, в том числе и гибридными, состоящими из дифференциально-алгебраических уравнений и статистических зависимостей.

Анализ литературных источников позволил выделить ряд экспериментально подтвержденных закономерностей, которые могут быть использованы при построении компьютерных моделей для описания процессов тепломассообмена в горных выработках глубоких шахт.

1. Основная часть тепла, поступающая к вентиляционному воздуху в горных выработках, воспринимается в скрытом виде за счет испарения влаги. Доля скрытых тепловыделений для различных горных выработок составляет от 70 до 90÷95% общего количества поступающего тепла. Учесть влияние многих факторов, формирующих процессы массообмена в выработках только на аналитическом уровне достаточно сложно, учитывая их стохастический характер, кроме того, получаемые исходные балансовые уравнения тепла и влаги являются чаще всего нелинейными.

2. Известно, что приращения энтальпии (Δi) и влагосодержания (Δx) влажного воздуха в горных выработках имеют тесные корреляционные связи и соответствующие закономерности характеризуются линейными уравнениями вида

$$\Delta i = a \Delta x + b, \quad (1.4)$$

$$\Delta x = a_1 \Delta i + b_1,$$

где Δi , Δx – соответственно, приращения энтальпии и влагосодержания влажного воздуха на достаточно протяженном участке горной выработки; a , b – постоянные коэффициенты, зависящие от вида горной выработки и тепловлажностных параметров воздуха.

Многие авторы для различных горных выработок приводят параметры уравнений (1.4), определенные путем обработки шахтных экспериментальных данных. Обычно коэффициенты корреляции для уравнений (1.4) достаточно высоки и лежат в пределах 0,85 – 0,97. Согласно литературным источникам, дополнительная статистическая информация позволяет установить характерные закономерности протекания процессов тепломассобмена в выработках вида (1.1).

В работ для шахт Донбасса определены параметры уравнений (1.4), которые равны: для воздухоподающих выработок $a_1 = 0,270$ кДж/кг, $b_1 = 0,21$ кДж/кг; для очистных выработок $a_1 = 0,296$ кг/кДж, $b_1 = 0,16$; для вентиляционных выработок $a_1 = 0,326$, $b_1 = - 0,04$, соответственно.

В некоторых работах для очистных выработок без охлаждения воздуха и с управлением кровлей полным обрушением рекомендованы следующие параметры уравнения (1.4): $a = 3,776$, $b = - 0,41$ или $a_1 = 0,247$, $b_1 = 0,36$. Для очистных выработок с охлаждением воздуха соответственно $a = 2,692$, $b = 5,10$ и $a_1 = 0,307$, $b_1 = - 1,09$. Авторы указанных работ отмечают зависимость параметров уравнения (1.4) от тепловых условий в выработках.

3. Многими исследователями экспериментально подтверждается факт зависимости массообменного числа Нуссельта от тепловлажностных и аэродинамических условий в горных выработках. Соответствующая закономерность характеризуется уравнением [1, 26, 29, 33]

$$Nu_D = A \cdot Re^m \cdot \pi^{-n}, \quad (1.5)$$

где $Re = \frac{\nu \cdot d}{\nu}$ - число Рейнольдса; $Nu_D = \frac{\beta \cdot d}{D}$ - массообменное число

Нуссельта; $\pi = \frac{P_s - P_n}{B}$ - массообменный параметр. Здесь β - коэффициент массоотдачи; ν, d - средняя скорость воздуха и эквивалентный диаметр горной выработки; P_s, P_n - парциальное давление водяных паров на поверхности выработки и в воздушном потоке; B - атмосферное давление; D, ν - коэффициенты молекулярной диффузии и кинематической вязкости воздуха.

Значения постоянной m обычно принимают для основных горных выработок равным 0.8, а для очистных выработок – 0.6. Значение постоянной n многие авторы принимают равным 0.5, имеются также экспериментальные работы, где величина n определена в диапазоне $0.22 \div 0.53$, в зависимости от вида горной выработки.

4. Важным показателем формирования процессов массообмена в горной выработке является гипотеза о значении парциального давления водяных паров на стенке выработки. Чаще всего в качестве гипотезы принимают парциальное давление водяных паров на стенке равным давлению насыщенных паров при температуре стенки $P_s = P_H(t_s)$. Подтвердить экспериментально данное положение не представляется возможным, особенно для условий горных выработок, где наблюдается многообразие процессов тепломассопереноса и шахтные эксперименты достаточно трудоемки. Однако косвенно, путем обработки шахтных данных, рядом исследований показано, что данная гипотеза может использоваться при прогнозах.

5. Для настройки параметров модели возможно применение закономерностей, отражающих факт линейного приращения относительной влажности воздуха по длине выработки на величину $\Delta\phi$ на каждые 100 м выработки. Величина $\Delta\phi$ задается для определенных горных выработок на основе статистической обработки шахтных данных.

Среднюю температуру поверхности в воздухоподающих и вентиляционных выработках обычно принимают равной средней температуре воздуха по сухому термометру $t_s = t$. Среднюю температуру поверхности в лавах можно принять в соответствии с уравнением $t_s = -2,54 + 0,258 \cdot t_p + 0,807 \cdot t$, где t_p – температура пород.

Возможно, определение величины t_s согласно теории нестационарного теплообмена с учетом времени существования выработки или путем адаптации моделей реальным шахтным данным, характеризующим тепловлажностные параметры воздуха в горных выработках.

6. Наблюдается существенное отличие в формировании процессов тепломассообмена в выработках без охлаждения и при искусственном охлаждении воздуха. Это объясняется нелинейностью процессов тепломассообмена при существенном изменении температуры и влажности в выработке. Однако, выполненный анализ литературных источников указывает на небольшое количество работ в области экспериментальных исследований теплового режима горных выработок при охлаждении и подогрева рудничного воздуха. Данные работы методически могут стать основой для прогнозирования тепловлажностных параметров вентиляционного воздуха в выработках с искусственным охлаждением. Основная проблема в этой области – это значительная зависимость параметров, характеризующих массообмен, от климатических условий в горной выработке. До настоящего времени соответствующие закономерности экспериментально изучены слабо, хотя исследование параметров тепломассообмена в горных выработках со значительным изменением температуры и влажности вентиляционного воздуха крайне актуально. Решение этого вопроса лежит в области статистического анализа и сравнения характеристик процессов тепломассообмена для выборок шахтных наблюдений, характеризующих процессы тепломассообмена в горных выработках с охлаждением и без охлаждения воздуха.

Из приведенных данных видно, что имеется ряд экспериментальных закономерностей, характеризующих процессы тепломассообмена в горных выработках, которые могут быть использованы при построении компьютерных моделей. Современные компьютерные технологии открывают большие возможности в визуальном моделировании сложных динамических систем, к которым можно отнести многие шахтные физические объекты. Визуальное моделирование предполагает использование графической формы описания модели, характеризующей процессы тепломассопереноса в горных выработках, и зримого представления результатов исследования. Основным элементом графического представления системы в современных программных средах является структурная схема объекта, построенная из модулей отдельных компонентов, соединенных функциональными связями. Как следует из анализа литературы до настоящего времени подобный подход к решению задач горной теплофизики практически не применялся, поэтому новизна данного направления очевидна.

1.2 Опыт применения и направления развития промышленных систем обработки рудничного воздуха в мировой практике

Для нормализации тепловых условий на шахтах Донбасса в 1970 – 1990 гг. были сооружены и работали 34 крупные поверхностные стационарные и подземные холодильные установки с суммарной холодопроизводительностью 250 МВт.

Наиболее широкое распространение поверхностные и подземные холодильные установки получили на шахтах ЮАР и Германии. Суммарная холодопроизводительность шахтных холодильных установок в этих странах составляет соответственно более 1000 и около 300 МВт. На рис. 1.1. приведена динамика изменения холодильной мощности на шахтах и рудниках ЮАР, Германии и Украины. Из приведенных данных видно, что развитие максимальных холодильных мощностей приходится в Германии и

Украине на 1985 – 1990гг. Уменьшение холодильной мощности в немецких шахтах после 1985г. объясняется сокращением количества шахт. В Украине это связано с выводом из эксплуатации экологически опасных холодильных машин, использующих хладагент R12, а также сложным экономическим положением угольной отрасли, падением добычи, закрытием ряда шахт и т.д.

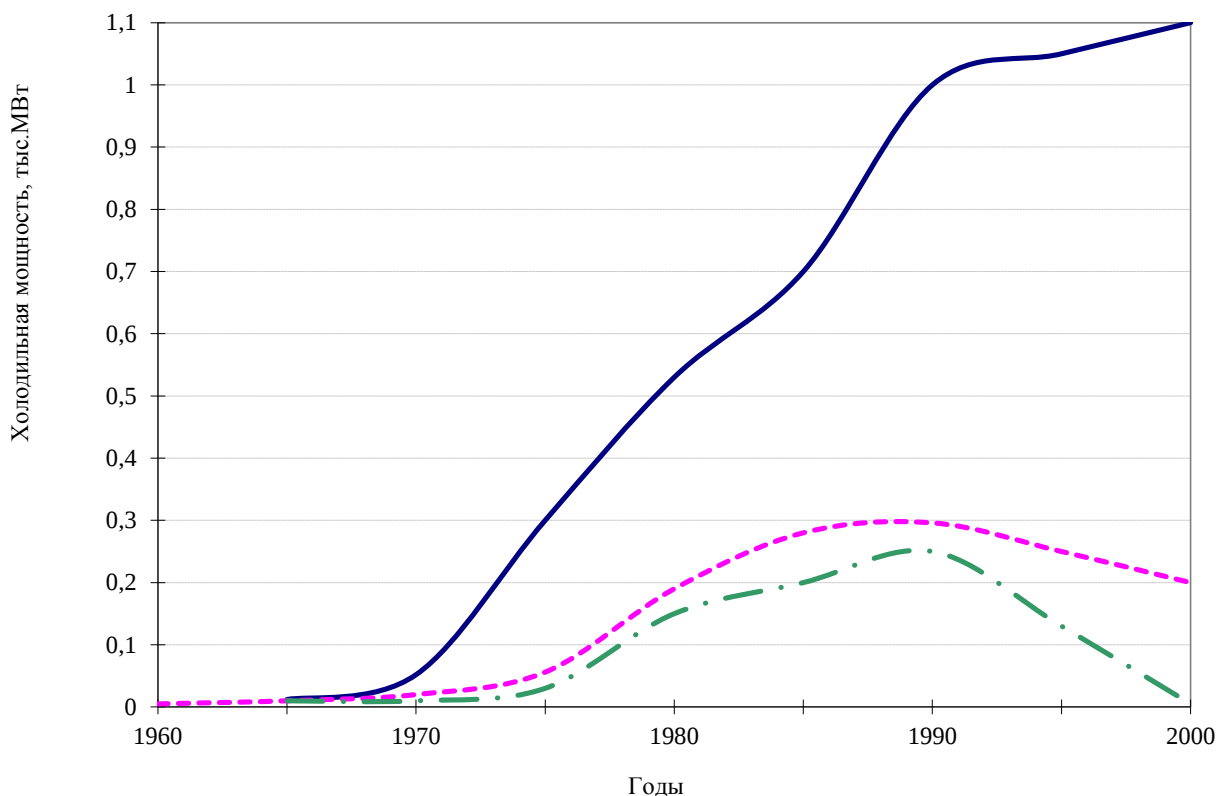


Рисунок 1.1. – Динамика изменения холодильной мощности стационарных холодильных установок на шахтах.

— ЮАР; - - Германия; - · - Украина.

Опыт эксплуатации шахтной холодильной техники в мире позволил отработать целый ряд технологических схем охлаждения рудничного воздуха. На шахтах применяются различные центральные схемы с расположением машин на поверхности или под землей и комбинированные схемы с расположением холодильных машин на поверхности и под землей. Применяются также различные модификации центральных схем с использованием для понижения давления хладоносителя турбин Пелтона,

гидротрансформаторов, гидравлических питателей вместо теплообменников высокого давления. На ряде шахт ЮАР и Германии технологические схемы охлаждения воздуха предусматривают охлаждение технологической воды, подаваемой в шахту.

Последние годы в практике охлаждения рудничного воздуха за рубежом стали большое внимание уделять системам охлаждения воздуха льдом. В предложенных системах в ЮАР решается сразу несколько задач: охлаждение рудничного воздуха и технологической воды, опреснение шахтной воды для технологических нужд, увеличение холодильной мощности установок для глубоких шахт с температурой пород более 60°C, интенсификация теплообмена в теплообменных аппаратах и уменьшение эксплуатационных затрат на производство холода. Еще в 1985 году, впервые в мировой практике, лед был использован в уже существовавших установках кондиционирования воздуха. Компания Anglo-American (ЮАР) разработала проект реконструкции системы охлаждения одного из рудников по добыче золотых руд, а компания President Steyn реконструировала систему охлаждения, которая стала вырабатывать 4365 т льда в сутки [100].

Анализ публикаций по этому вопросу показал, что все рассмотренные схемы и устройства использования льда можно разделить на три основных типа. К первому типу относятся устройства, в которых ледяная пульпа (смесь воды и льда) в соответствующих теплообменниках охлаждает воздух или оборотную воду, поступающую от воздухоохладителей. В системах второго типа происходит разделение пульпы на воду и лед, после чего каждая из фаз в соответствующих устройствах охлаждает воздух. И, наконец, к третьему типу относятся установки, в которых лед после пневматической транспортировки помещается в камеры, где происходит теплообмен его с теплой оборотной водой, поступающей от средств охлаждения воздуха.

Установка последнего типа используется в ЮАР на одном из золотодобывающих рудников восточного Ронда глубиной 4000 метров. При создании установки проведены расчеты трех альтернативных шахтных

систем кондиционирования: с получением водяного льда на поверхности и использованием его как хладоносителя; с использованием водоохлаждающей холодильной машины на поверхности и турбины Пельтона для рекуперации энергии потока воды, поступающей к охлаждающим устройствам; и с подземной холодильной установкой и отводом тепла конденсации хладагента в подземной градирне. Экономическое сравнение (табл. 1.1) показало, что общие капитальные затраты для всех вариантов отличаются незначительно, однако по мнению авторов льдоиспользующая система имеет в сравнении с традиционными системами охлаждения рудничного воздуха значительные преимущества. Положительной особенностью данной схемы кондиционирования воздуха в шахтах является также возможность деминерализации шахтных вод.

Обзор результатов работ по охлаждению рудничного воздуха льдом выполненный И. Фоссом позволил сделать вывод, что применение льда рентабельно для крупных холодильных установок предназначенных для глубоких шахт с высокой температурой пород (более 55-60°C). Однако практика применения холода в высокопроизводительных очистных забоях Германии потребовала использования льдогенераторов и охлаждения воздуха льдоводяной смесью в лавных воздухоохладителях уже на глубинах 1400 м и объемах добычи угля в лаве более 3000 т/сут.

Крупная льдоиспользующая установка охлаждения воздуха эксплуатируется на золотодобывающем руднике «Хармони» в ЮАР уже 17 лет.

Таблица 1.1. -

Параметры поверхностной системы охлаждения рудничного воздуха, использующей в качестве хладоносителя лед и воду

Показатели и единицы измерения	Глубина			
	3000 м		4000 м	
	Лед	Вода	Лед	Вода
Потребляемая холодильная мощность, МВт	25,0	25,0	50,0	50,0
Общая холодильная мощность на поверхности, МВт	27,4	31,1	56,5	66,7
Расход воды или льда в первичном контуре, кг/с	60	290	120	600
Производство льда, кг/сут	5100	-	10200	-
Отношение расхода воды к добыче, т/т	1,3	6,4	2,6	13,2
Температура льда или воды на поверхности, °С	-5,0	6,0	-5,0	6,0
Потребляемая электрическая мощность, МВт	10,8	14,0	25,4	35,7
Стоимость энергии при 3000 ренд за кВт, млн. ренд	32,4	42,0	76,2	107,0
Капитальные затраты (включая стоимость одинаковых элементов), млн. ренд	18,8	13,2	38,8	29,8

Холодильная мощность установки 5,2 МВт, что соответствует суточной производительности 1000 т льда. Лед готовится в 12 льдогенераторах и по пластиковым трубопроводам подается в подземный плавитель, расположенный на глубине 1088 м. Для получения холода применяются аммиачные винтовые компрессоры «Xoyden WRV 321/16535» холодопроизводительностью по 2748 кВт. Использование льда в качестве хладоносителя позволяет применять на поверхности шахт аммиачные машины при бесконтактном замораживании воды или использовать контактное замораживание экологически безопасными хладагентами, такими как бутан или изобутан.

Одним из недостатков льдоиспользующих систем является их энергоемкость. Однако, совместное использование такой технической системы для охлаждения воздуха и деминерализации шахтных вод делает льдоиспользующую систему значительно более конкурентоспособной по сравнению с традиционными системами кондиционирования рудничного воздуха.

Учитывая сложность оценки технической и экономической целесообразности создания холодильно-деминерализующих систем был проведен патентный поиск технических решений в этой области. Выполненные исследования показали, что ведущие производители и фирмы мира уделяют значительное внимание разработке комбинированных способов и средств охлаждения воздуха и деминерализации воды за счет использования льда. Наиболее интересны в этой области, следующие технические решения. Наибольшее внимание вопросу опреснения морских (соленых) вод вымораживанием уделяется в Японии и США.

В настоящее время в мире при опреснении больших объемов соленой морской воды широко применяются холодильные методы. В промышленности в этом плане апробировано несколько видов холодильной технологии. Наиболее распространен способ замораживания воды через теплообменную поверхность. Этот способ получения холода и деминерализации воды не позволяет обрабатывать большие объемы соленых вод в связи с высокой энергоемкостью, однако именно эта технология принята за базовую при создании шахтных льдоиспользующих установок в ЮАР и Германии.

Более эффективными, хотя и более сложными, являются способы, которые реализуют непосредственный контакт хладагента и соленой воды. Этот принцип положен в основу технологии вакуумного замораживания соленой воды и прямого замораживания воды хладагентом. Способ прямого замораживания соленой воды хладагентом считается наиболее эффективным. Замораживание воды осуществляется при кипении хладагентов в воде, которые не смешиваются с ней: бутана, изобутана, пропана, фреонов, метилхлорида и др. Принципиальная схема такого опреснителя фирм «Струзерс», «Блоу-Нокс» (США), работающих по двухступенчатому холодильному циклу на изобутане, приведена на рис.1.2.

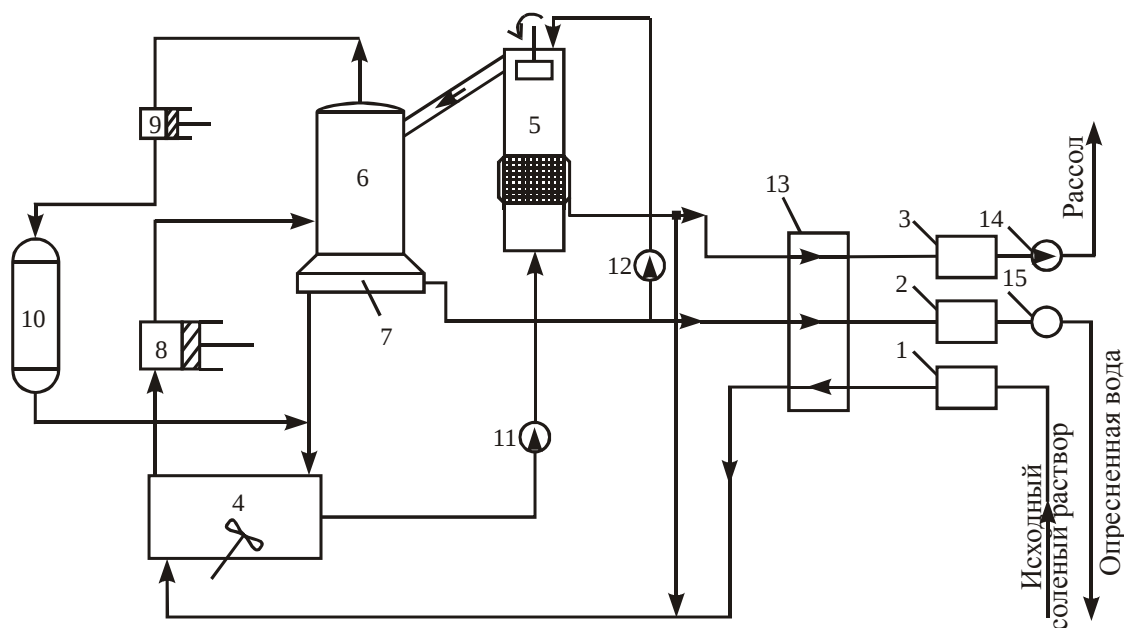


Рисунок 1.2. – Технологическая схема установки опреснения соленых вод замораживанием при контакте с хладагентом:

1 – деаэратор исходного раствора; 2, 3 – дегазаторы опресненной воды и рассола; 4 – кристаллизатор; 5 – промывная колонна; 6 – конденсатор-плаватель; 7 – отстойник; 8 – основной компрессор; 9 – дополнительный компрессор; 10 – дополнительный конденсатор; 11, 12, 13, 14, 15 – насосы; 13 – теплообменник.

Наиболее полный сравнительный анализ эффективности опреснения соленых вод с использованием различных промышленных технологий был проведен институтом «Донгипрошахт». Анализ эффективности опреснения соленых вод по разным технологиям с целью их применения на шахтах выполнен по имеющимся данным для зарубежным установок, которые работают на морской воде с минерализацией от 7 до 15 г/л. Данные по капиталовложениям и стоимости опреснения соленых вод приведены в таблице 1.2.

Работы по направлению использования льда для охлаждения рудничного воздуха и деминерализации шахтных вод выполнялись в ИГТМ НАН Украины. Проведенные работы позволили предложить холодильную

установку использующую апробирование технологии холодильного опреснения вод на основе получения льда. В процессе исследований авторами изучались две технологические схемы шахтных холодильно-опреснительных установок: с парокomppressorными холодильными машинами и с системой адиабатно-вакуумного замораживания.

Первая схема установки близка по конструкции к установке спроектированной и построенной на руднике ERPM в ЮАР. Установка скомпонована на базе промышленных льдогенераторов, производительностью 70 т/сут, которые хорошо зарекомендовали себя в работе. Например, в Бразилии (г. Итайру) более 15 лет эксплуатируется установка для получения льда производительностью 1300 т/сут из морской воды. Предложенная ИГТМ НАН Украины технологическая схема холодильно-опреснительной установки представлена на рис. 1.3.

В шахтной холодильной установке использованы 6 типовых льдогенераторов, в которых в качестве хладагента используется аммиак. Полученный лед конвейером транспортируется к стволу, далее по пластиковым трубопроводам пневмотранспортом подается в шахту. После охлаждения воздуха вода сбрасывается в систему общешахтного водоотлива. Проведенные исследования показали, что производство льда при деминерализации шахтной воды значительно превышает потребность в холоде шахтной системы кондиционирования воздуха. Это обстоятельство позволило исключить необходимость использования дополнительного специального холодильного оборудования для целей кондиционирования воздуха. Таким образом, поверхностный комплекс представляет собой льдообразующую систему для охлаждения воздуха и деминерализации сточных шахтных вод.

Таблица 1.2. -

Технико - экономические данные промышленных деминерализационных установок

Тип установки	Продуктивность, м ³ /сут	Удельные капиталовложения, долл. США за м ³ /сут	Стоимость опреснения воды, долл. США/м ³
Испаритель быстрого вскипания	5000	2684	1,2÷1,8
Обратноосмотическая одноступенчатая (мембраны - полые волокна)	18000	1065	1,0÷1,6
Обратноосмотическая одноступенчатая (рулонные мембраны)	5000	2460	1,4
	45000	2440	1,0
	200000	1625	0,4÷0,6
Вакуум-компрессорная термическая	600÷1000	1300÷1600	1,0÷1,2
	18000	1242	0,8÷1,0
низкотемпературная льдоиспользующая			
Горизонтально – пленочная льдоиспользующая	140000	1350	0,35÷0,5

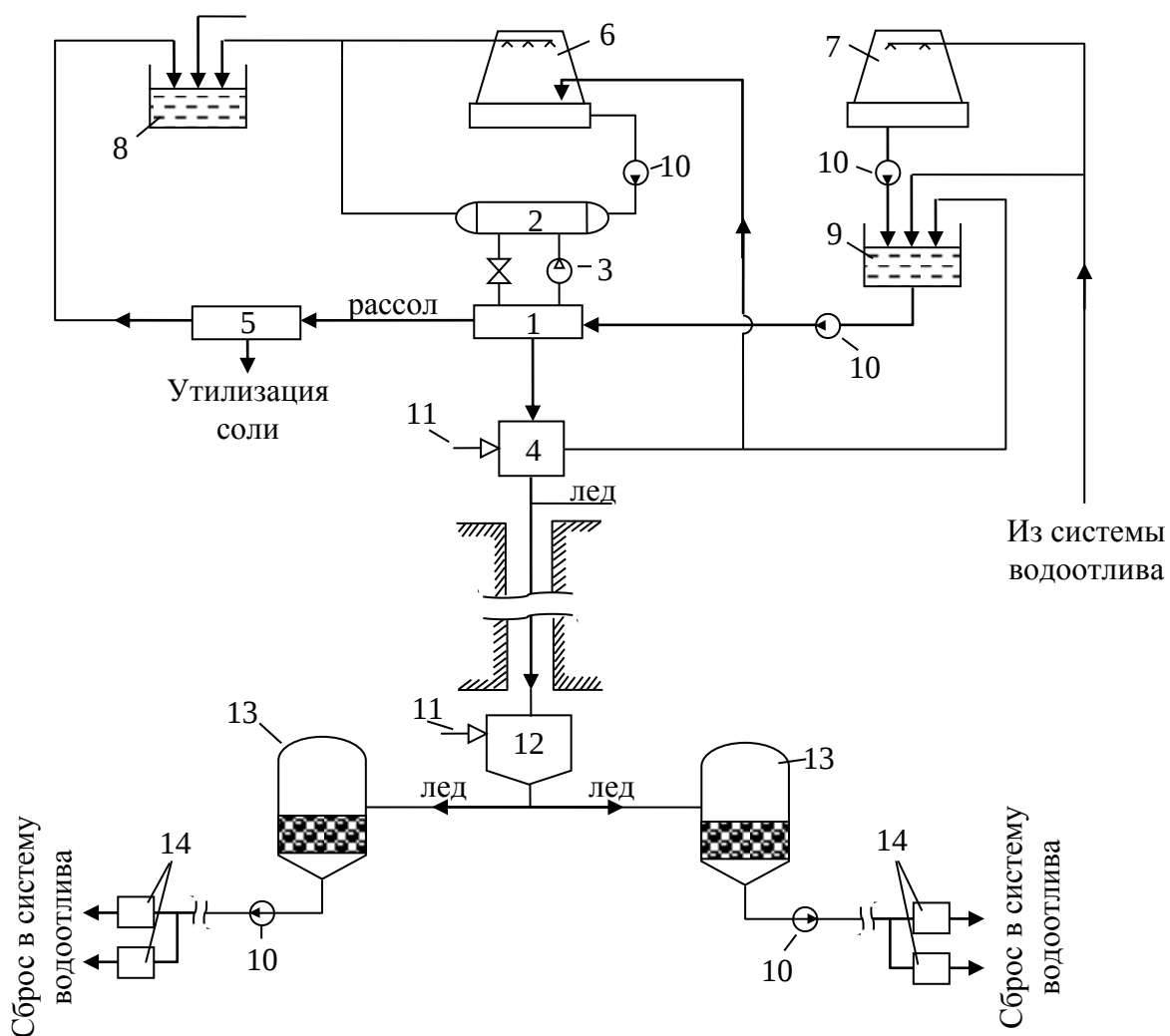


Рисунок 1.3. - Шахтная опреснительно-холодильная установка:

1 – испаритель-льдогенератор; 2 – конденсатор; 3 – компрессор; 4 – сепаратор-гранулятор; 5 – солеотделитель; 6, 7 – градирни; 8 – водосборник пресной воды; 9 – водосборник-осветитель; 10 – насосы; 11 – подача сжатого воздуха; 12 – подземный бункер льда; 13 – льдоводяные теплообменники; 14 – воздухоохладители.

В качестве второй технологической схемы ИГТМ предложена комбинированная схема установки, приведенной на рис. 1.3, в которой используется вакуумный опреснитель. В работе предлагается двухступенчатая схема получения льда – в первой ступени вода охлаждается до температуры близкой к 0°C , во второй ступени замораживается в вакуумном льдогенераторе. Окончательно авторы остановились на этом

варианте льдоохлаждающей системы. Однако в настоящее время во всем мире вакуумные вымораживающие системы применяются мало из-за высокого энергопотребления.

Предложения института ИГТМ достаточно интересны, так как позволяют снизить вдвое капитальные затраты на создание установок охлаждения шахтного воздуха и деминерализации сточных вод, но дальше стадии предпроектных проработок они реализованы не были.

Проведенные исследования позволили выявить следующие важные тенденции в развитии современных систем охлаждения рудничного воздуха в мире.

За последние 10 лет произошло существенное совершенствование шахтной холодильной техники. В Германии в 1990 г. среди крупных центральных холодильных станций на шахтах 30% приходилось на станции, расположенные на поверхности (средняя холодопроизводительность $Q_0=9,0$ МВт), 40% на подземные станции ($Q_0=6,0$ МВт) и 30% на станции комбинированного размещения ($Q_0=6,2$ МВт). В настоящее время доля холодильных станций подземного размещения возросла. Это объясняется созданием рядом фирм мощных компактных холодильных машин, позволяющих довести суммарную холодопроизводительность подземных холодильных станций до 10-12 МВт. В ЮАР на руднике «Президент Стейн» действует подземная холодильная установка холодопроизводительностью 63 МВ.

Совершенствование техники охлаждения воздуха позволяет в современных условиях достигать холодильной мощности в очистном забое 4-7 тыс. кВт за счет применения штрековых воздухоохладителей большой мощности, лавных воздухоохладителей, мощных воздухоохладителей с подачей льдоводяной смеси и охлаждения технологической воды. Это позволяет вести добычу угля на глубине 1400 м при нагрузке на забой от 3000 т/сут до 7000 т/сут. Уже сейчас в особо тяжелых условиях

осуществляется переход добычных смен на технологию безлюдной выемки угля.

В шахтах ЮАР достаточно широко применяются на поверхности аммиачные холодильные машины с винтовыми компрессорами. Наблюдаются тенденции расширения применения льда не только на золотодобывающих шахтах ЮАР, но и на угольных шахтах Германии. На шахтах ЮАР эксплуатируются несколько поверхностных стационарных льдопроизводящих холодильных установок холодильной мощностью 2,5 - 5,0 МВт, которые используют серийные аммиачные промышленные льдогенераторы. Ведутся работы по созданию экспериментальных двухступенчатых вакуумных замораживающих систем. В 2002 г. в Германии впервые на шахте «Ост» в очистном забое при температуре горных пород 65°C и добычи 7000 т угля в сутки, использованы передвижные подземные льдогенераторы типа DV 350 фирмы «Верме-Аустауш-Техник» холодопроизводительностью 250 кВт.

На шахтах применяется также охлаждение технологической воды там, где ее расходы позволяют получить высокую холодильную мощность. Совершенствование подземных систем распределения холода идет по пути оптимизации проектных решений, внедрения микропроцессорных систем регулирования расходов хладоносителя в сетях и пунктах охлаждения и использования новых технических решений, например, путем применения гидравлических питателей фирмы «Siemag Transplan» (Германия) или установок Пелтона вместо теплообменников высокого давления.

Обычные штрековые воздухоохладители номинальной мощностью 250 - 300 кВт на шахтах Германии к 1998 г. были заменены на крупные воздухоохладители мощностью до 600 - 800 кВт, получила также развитие тенденция применения мощных оросительных воздухоохладителей.

Обработка данных МакНИИ по 15 наиболее глубоким шахтам Донбасса к 2003 г. показывает, что холодопотребность 60% шахт лежит в пределах 1 - 2 МВт, среднее значение – 1430 кВт. Специалисты считают, что

в настоящее время следует ориентироваться при создании холодильных машин на холодопроизводительность 500 - 1000 кВт и, в перспективе, на 1000 – 2000 кВт в одном блоке.

Этот же факт подтверждает параметрический ряд шахтных холодильных машин различных фирм мира. Для определения средств охлаждения воздуха необходимо реализовать возможность построения имитирующих моделей «производственная среда – средства охлаждения воздуха».

1.3 IT системы прогноза тепловых условий в шахтах.

Как в нашей стране, так и за рубежом разрабатываются пакеты прикладных программ, позволяющие с высокой степенью точности проектировать, анализировать и прогнозировать воздухораспределение в вентиляционных сетях.

Разработка подобных программ предоставляет широкий спектр возможностей инженерно-техническим работникам горных предприятий по обеспечению эффективности и безопасности функционирования вентиляционных сетей. Прежде всего можно отметить следующие наиболее полезные функции существующих на данный момент компьютерных программ:

- выполнение расчетов вентиляции при оперативном и перспективном планировании;
- проведение финансового анализа вариантов вентиляционных сетей;
- моделирование возможных опасных ситуаций на шахтах, связанных с вентиляцией.

Рассмотрим некоторые программные продукты.

“*Вентиляция*” – это программа расчета нормального и аварийного воздухораспределения в шахте. К основным возможностям программы относятся:

- формирование пространственной топологии горных выработок;

- установка в выработки шахты вентиляторов, перемычек и людей с указанием параметров, специфичных для каждого типа;
- расчет естественного воздухораспределения в шахте;
- расчет устойчивости проветривания при изменении сопротивления в одной или нескольких выработках;
- расчет устойчивости проветривания при пожаре в одной из выработок;
- и др.

На рис. 1.4 и рис. 1.5 показаны рабочие окна программы «Вентиляция» с пространственной схемой выработок шахты и результатами расчета воздухораспределения соответственно.

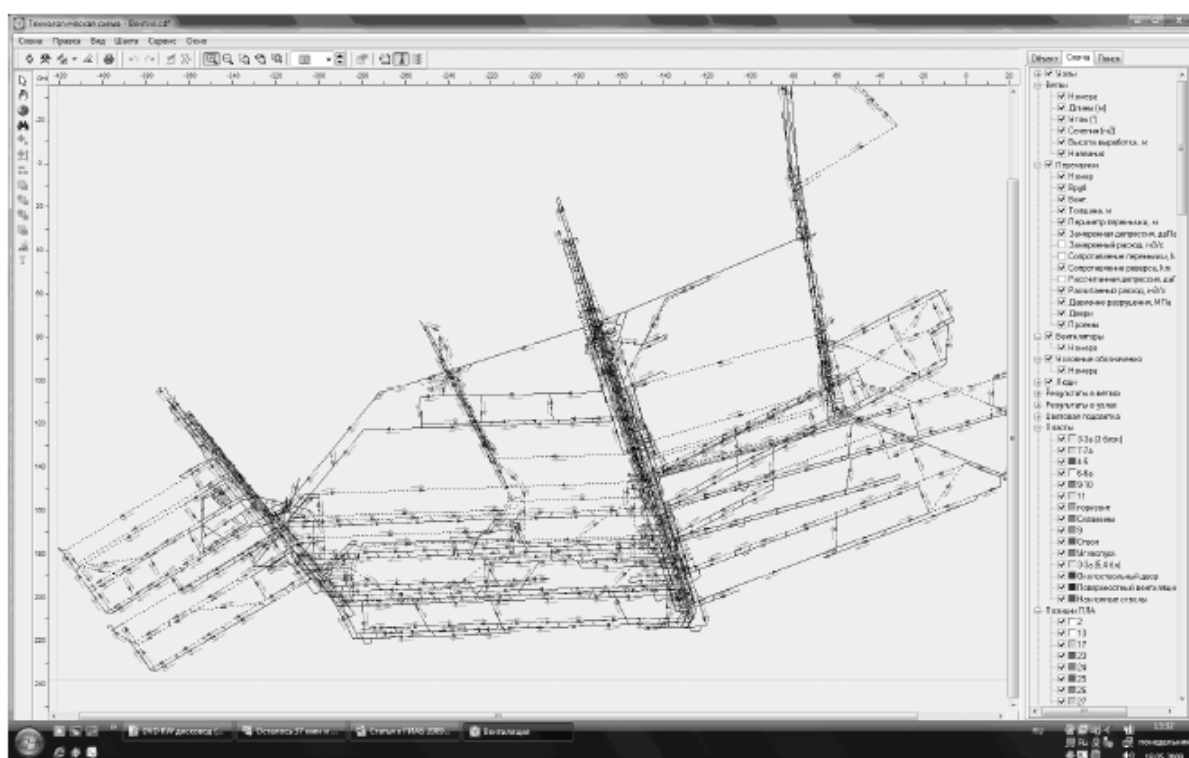


Рис. 1.4 Окно программы «Вентиляция». Схема вентиляции.

Программное обеспечение (ПО) «Вентиляция-ПЛА», разработанное в ИГД им. Скочинского (Романченко С.Б. и др.), обладает теми же возможностями, что и пакет «Вентиляция», но дополнительно с помощью данного комплекса можно проводить расчеты устойчивости проветривания, построение оптимальных маршрутов вывода горнорабочих и движения подразделений горноспасателей, определение зон загазирования и

маршрутов вывода горнорабочих на схеме вентиляции при возникновении аварий, связанных с задымлением, пожарами, взрывами.

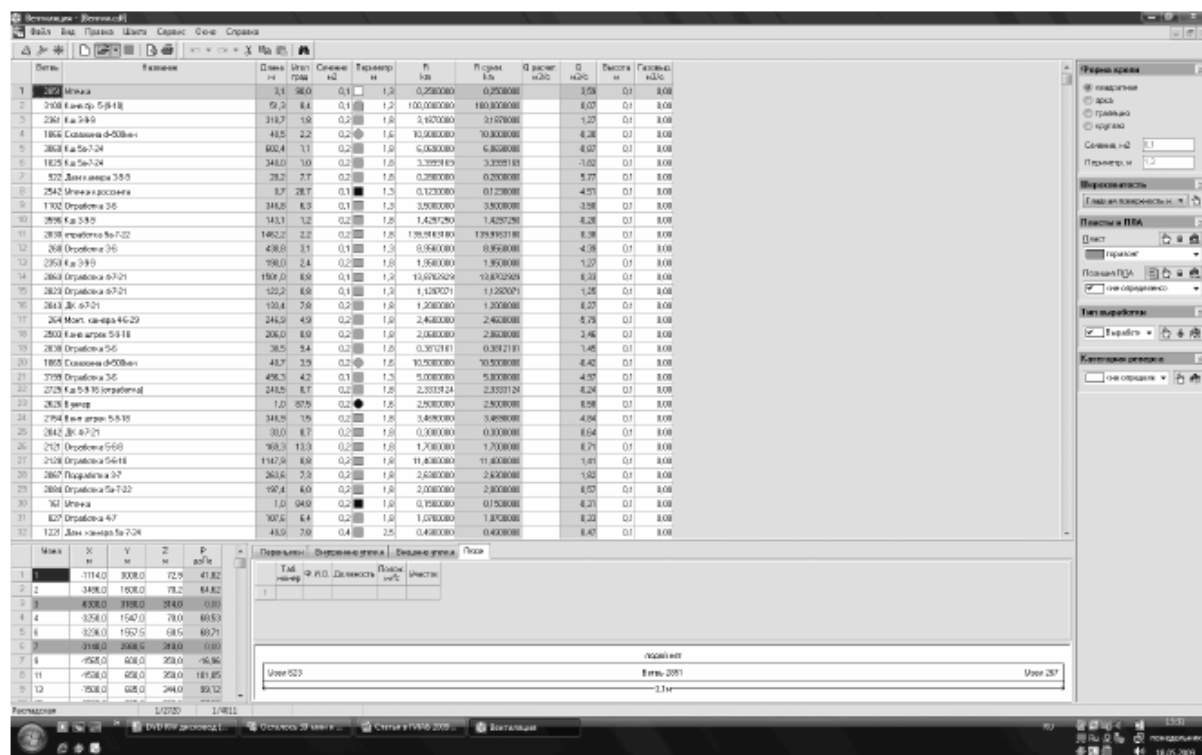


Рис. 1.5 Окно программы «Вентиляция». Результаты моделирования.

Одним из самых мощных ПО на сегодняшний день в области моделирования течений реагирующих потоков (включая горение), теплообмена, многофазных течений и т. д. является пакет «FLUENT». Посредством обеспечения различных параметров моделирования и использования многосеточных методов с улучшенной сходимостью, он обеспечивает оптимальную эффективность и точность решения для широкого диапазона моделируемых скоростных режимов. Изобилие физических моделей в пакете FLUENT позволяет точно предсказывать ламинарные и турбулентные течения, различные режимы теплопереноса, химические реакции, многофазные потоки и другие феномены на основе гибкости сеток и их адаптации на основе получаемого решения.

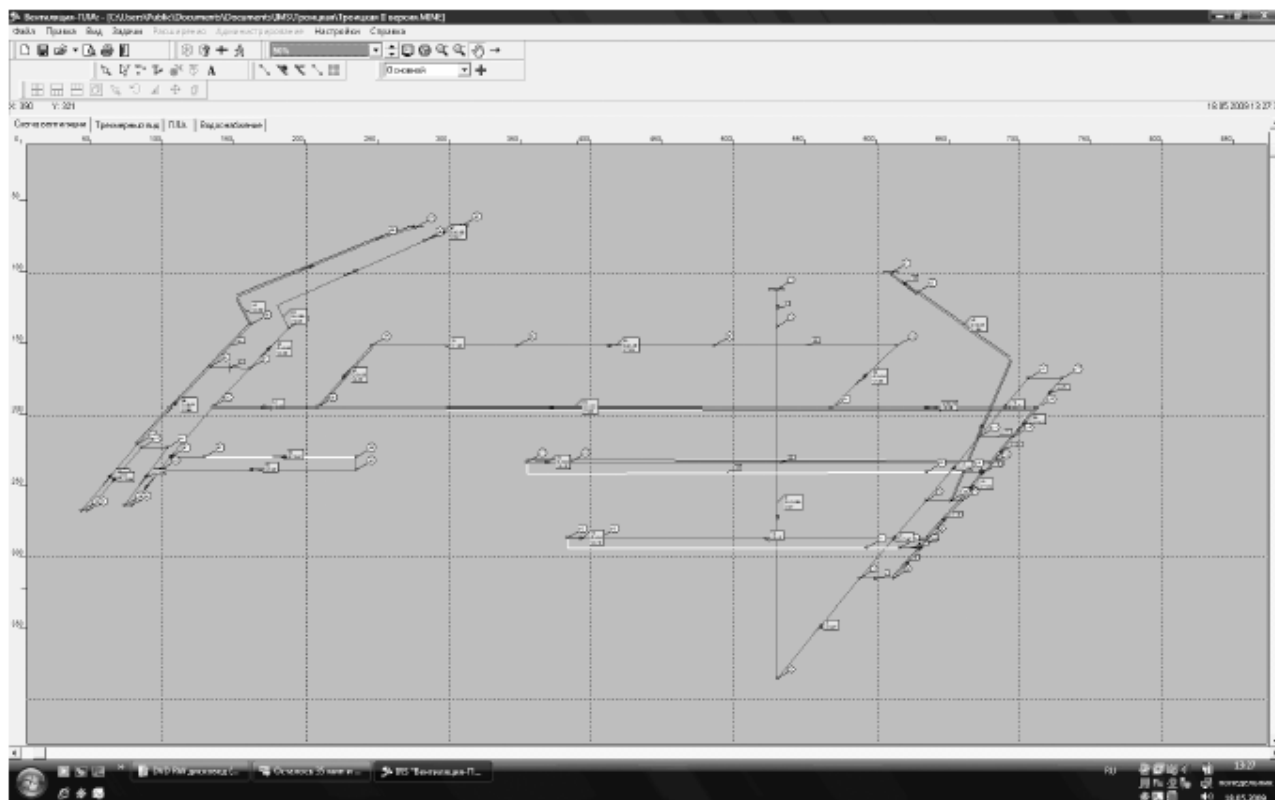


Рис. 1.6 Окно программы «Вентиляция-ПЛА». Расчет параметров вентиляции.

Пакет имеет следующие возможности:

- моделирование 2D планарных, 2D осесимметричных, 2D осесимметричных с завихрениями и 3D потоков;
- моделирование установившихся или переходных потоков;
- моделирование всех скоростных режимов;
- моделирование невязких, ламинарных и турбулентных потоков;
- моделирование ньютоновских и неньютоновских течений;
- широкий набор моделей турбулентности;
- моделирование теплопереноса, включая различные виды конвекции, коньюгированный теплоперенос и излучение;
- использование специальных моделей для вентиляторов, радиаторов и теплообменников;
- использование динамических сеток для моделирования потоков вокруг движущихся объектов и др.

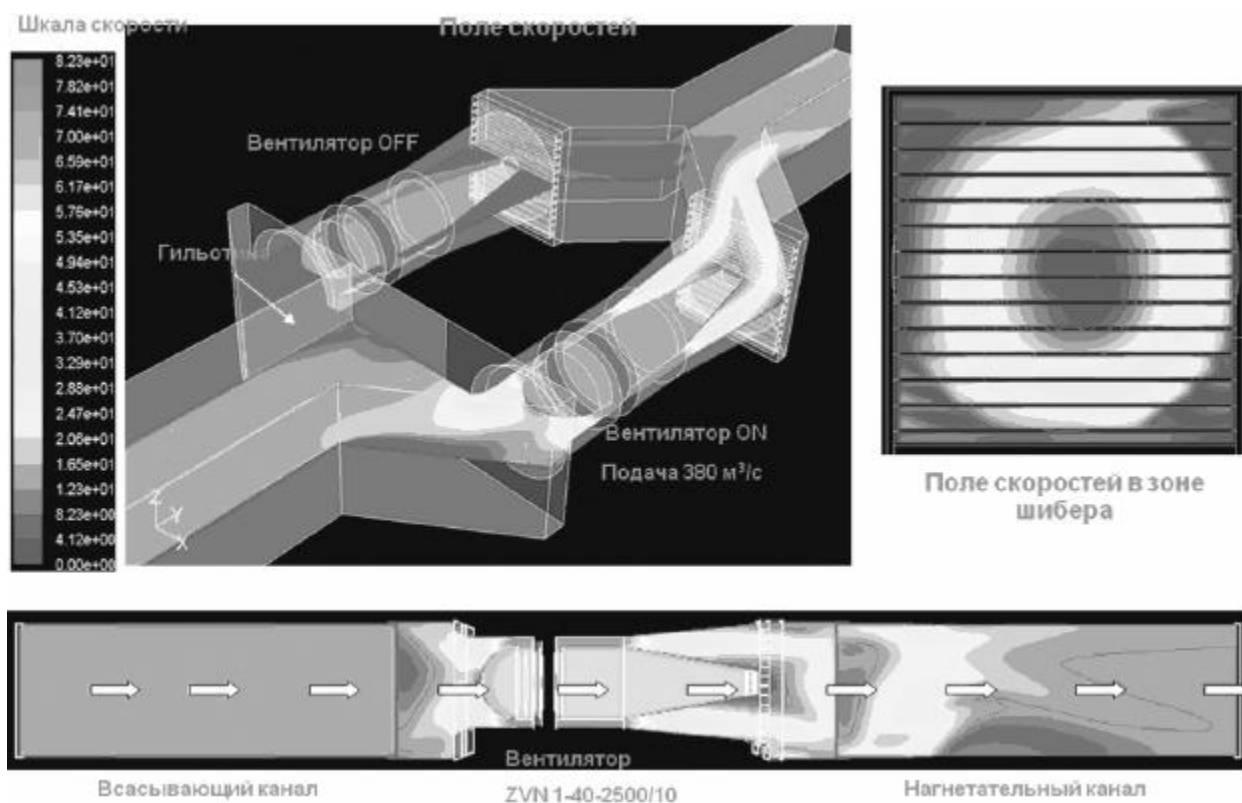


Рис. 1.7 Окно программы «FLUENT». Расчет характеристик вентиляторных установок.

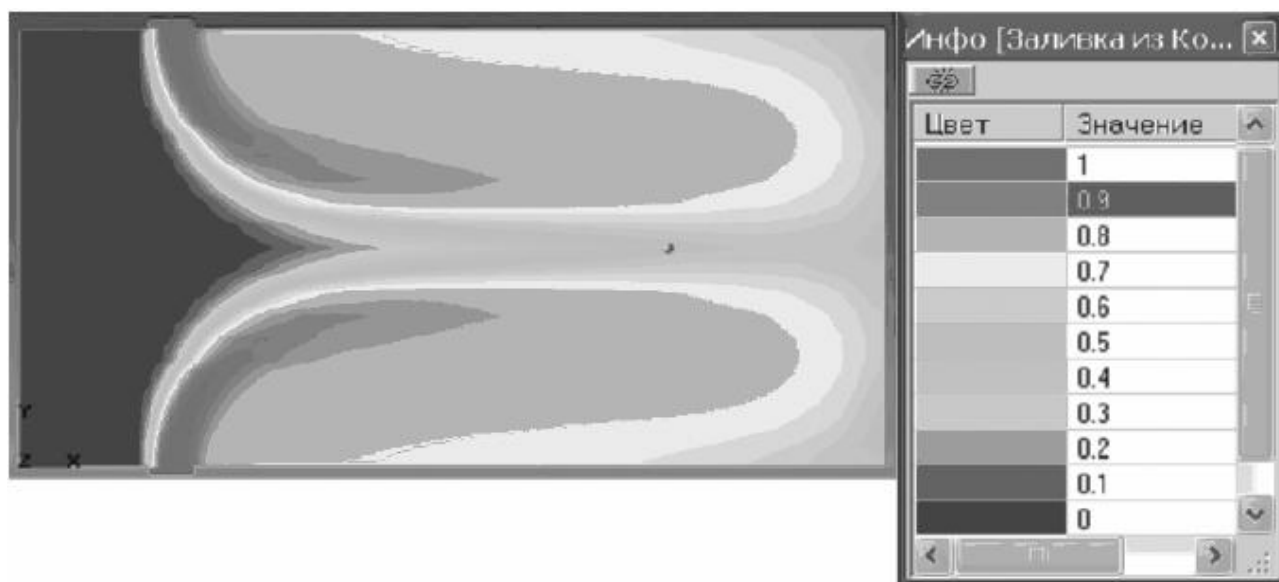


Рис. 1.8 Окно программы «FLUENT». Распределение концентрации вещества (примеси), поступающего из боковых отверстий в среду с движущимся потоком воздуха.

1.4 Выводы и задачи исследований

Результаты раздела позволили сформулировать следующие выводы.

Дальнейшее развитие угля подземным способом проводится за счет освоения больших глубин. К 2020 г. 25% шахт перейдут на глубины свыше 1100 м. Между тем мощность холодильных систем на шахтах за последние 15 лет снизилась. Практически полная ликвидация парка шахтной холодильной техники предопределяет восстановление центральных холодильных станций в будущем по меньшей мере на 15 – 20 шахтах. Основная причина выведения из эксплуатации шахтной холодильной техники связана с запрещением использования озоноопасного хладагента R12 и отсутствием средств на восстановление парка холодильной техники.

Задачи прогноза и регулирования микроклимата глубоких шахт сегодня являются крайне актуальными, так как количество шахтеров, работающих в неблагоприятных условиях неуклонно возрастает.

Существующие методы и методики прогнозирования климатических условий в глубоких шахтах отличаются преимущественно аналитико-эмпирическим подходом основанным на использовании уравнений теплового и массового баланса. В последние годы появился ряд современных программных продуктов применяющих технологию визуального объектно-ориентированного моделирования в специальных графических средах, что позволяет вывести на новый уровень методику численного моделирования и прогнозирования параметров, которые характеризуют тепловой режим в глубоких шахтах и рудниках. Анализ закономерностей, определяющих процессы тепломассообмена в выработках глубоких шахт, указывает на достаточно полное изучение этих процессов в выработках без искусственного охлаждения воздуха. В горных выработках выемочных участков глубоких шахт с искусственным охлаждением воздуха процессы тепломассопереноса недостаточно изучены как в теоретическом, так и в

экспериментальном плане, поэтому разработка новых методов прогноза теплового режима в таких выработках является актуальной задачей.

С учетом выполненного анализа в работе были поставлены и решены следующие задачи.

1. Обобщить существующие закономерности формирования процессов тепломассообмена в горных выработках глубоких шахт и разработать компьютерные модели прогноза тепловлажностных параметров воздуха и определения необходимой для нормализации тепловых условий холодопроизводительности средств охлаждения.

2. Исследовать тепловые условия на выемочных участках при искусственном охлаждении воздуха и провести сравнительный анализ закономерностей формирования теплового режима в горных выработках с охлаждением и без охлаждения воздуха на основе статистического анализа шахтных экспериментальных данных.

3. Выявить особенности технологических процессов охлаждения рудничного воздуха на горнодобывающих предприятиях, провести анализ параметров и определить исходные данные для проведения вычислительных экспериментов.

4. Провести вычислительные эксперименты на основе компьютерных моделей и определить параметры средств искусственного охлаждения рудничного воздуха.

2. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА МЕЖДУ ШАХТНЫМ ВОЗДУХОМ И ГОРНОЙ СРЕДОЙ

2.1 Принципы построения, структурная схема и функции компьютерной модели

Выемочный участок с системами обработки воздуха можно рассматривать как сложную физическую систему, которая характеризуется количественными взаимосвязями между входными и выходными тепловлажностными параметрами вентиляционного воздуха. При этом на процесс формирования теплового режима в горной выработке оказывает воздействие исключительное многообразие внешних влияющих факторов, из которых можно выделить следующие наиболее существенные – расход вентиляционного воздуха, глубина ведения работ и температура горных пород, горнотехнические параметры участка (сечения, периметры и длины участков выработок, характеристики проветривания и управления кровлей и т.д.), мощность и особенности работы оборудования, показатели, характеризующие массообмен, и т.п.

Для решения поставленных в работе задач в области прогнозирования тепловлажностных параметров вентиляционного воздуха необходимо сформулировать математическое описание процессов, определяющих тепломассообмен на выемочном участке, которое позволило бы построить компьютерную прогнозную модель.

Построение модели будем основывать на балансовом принципе. Учитывая то, что основная часть тепла, поступающего к вентиляционному воздуху в горных выработках, воспринимается в скрытом виде за счет испарения влаги, в основу модели положим уравнение массового баланса. В связи с протяженностью горных выработок выемочного участка математическую модель сформулируем в виде балансовых уравнений с

распределенными параметрами. Кроме того, в реальных шахтных условиях процессы массообмена носят явно выраженный стохастический характер, поэтому предусмотрим возможность использования в модели вероятностных параметров за счет стохастического моделирования ряда характеристик и исходных данных модели. Такой подход позволит реализовать проведение статистического эксперимента, что возможно только с применением средств вычислительной техники.

Таким образом, для прогноза тепловлажностного состояния воздуха в горной выработке используем уравнение массового баланса, которое для элементарного участка выработки dy имеет вид:

$$V \cdot d\rho_n = \beta \cdot (\rho_H(t_s) - \rho_n) \cdot U \cdot dy \quad (2.1)$$

Здесь $V = v \cdot S$ - объемный расход воздуха в выработке; U, S - периметр и сечение выработки; y - продольная координата; $\rho_H(t_s), \rho_n$ - плотность насыщенного водяного пара при температуре поверхности выработки и плотность водяного пара в потоке воздуха.

Для определения температурных условий в горной выработке воспользуемся дополнительно к (2.1) алгебраическими уравнениями вида (1.4). В этом случае задача прогнозирования тепловлажностных параметров воздуха на выемочном участке будет сведена к решению системы алгебро-дифференциальных уравнений для последовательности выработок выемочного участка. В компьютерной модели ряд исходных данных и характеристик могут быть заданы с помощью генераторов случайных чисел, имитирующих определенные виды распределений. При указанной постановке для решения задачи перспективно применение принципа компонентного моделирования динамических систем в среде Matlab-Simulink с использованием численных решателей на основе стандартных программных реализаций. Структурная схема компьютерной модели для этого случая показана на рис. 2.1.

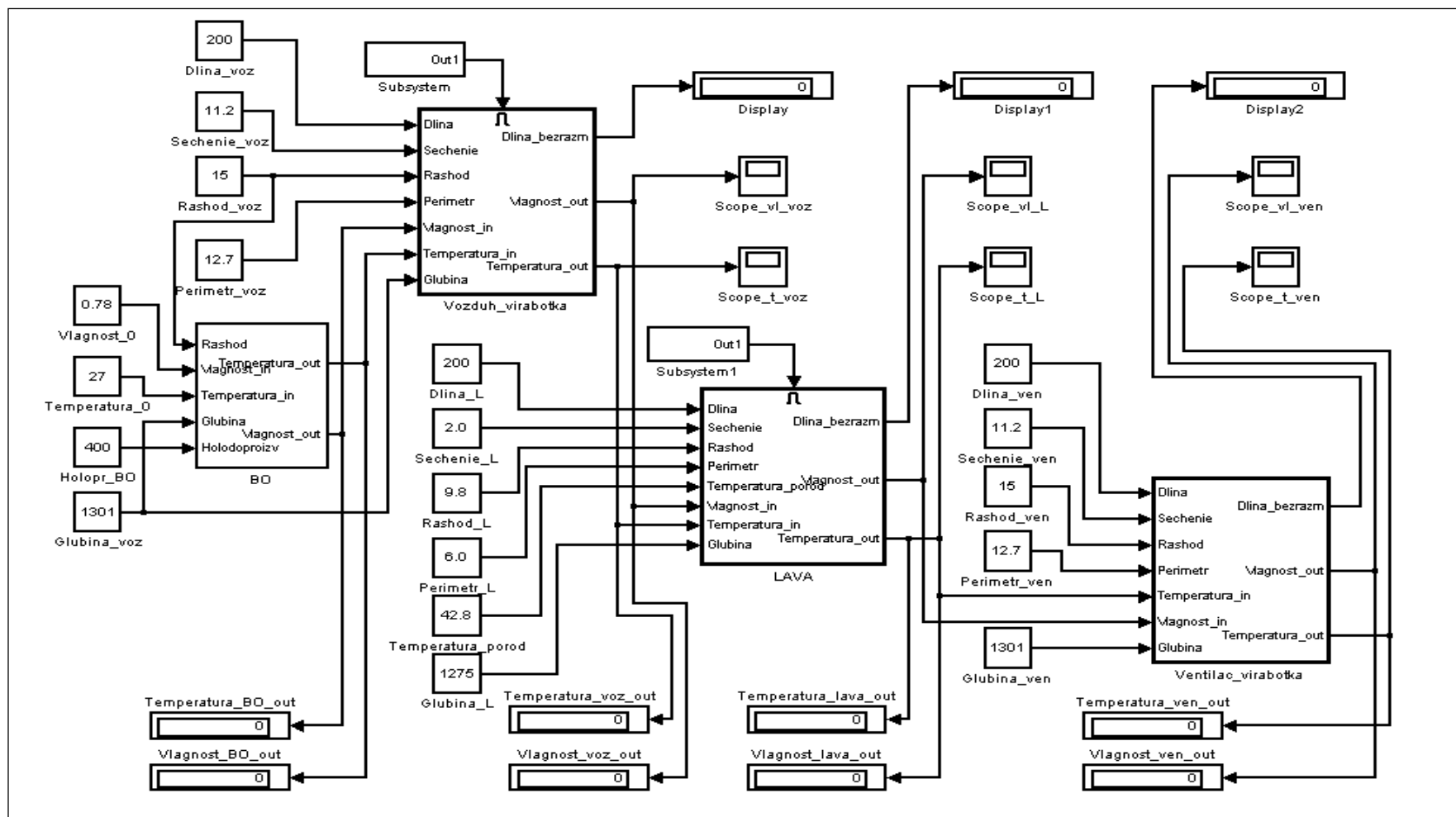


Рисунок 2.1. - Структурная схема компьютерной модели для описания процессов тепломассообмена на выемочном участке

Приведенная схема предполагает задание исходных данных в виде постоянных источников (*Sources*) или статистически распределенных величин с помощью М-функций (*Matlab Function*) системы Matlab. Каждая участковая выработка – воздухоподающая, очистная или вентиляционная, а также система охлаждения воздуха моделируются в виде подсистем соответствующими подпрограммами *Sybsystem*. Результаты моделирования тепловлажностных параметров воздуха выводятся на виртуальные осциллографы и дисплеи.

Как показывает анализ, компьютерная модель должна обеспечивать выполнение следующих основных функций:

- автоматизацию процесса компоновки модели за счет применения при компьютерном проектировании технологии визуального моделирования, что позволяет обеспечить графическое представление моделируемой системы при высокой скорости реализации отдельных вариантов;
- адекватное представление и численную реализацию математической модели, описывающей процессы формирования тепловлажностных параметров вентиляционного воздуха на выемочном участке;
- ввод, отображение и изменение исходных данных и параметров по каждому виду горной выработки выемочного участка и объектам управления тепловым режимом, а также визуализацию результатов моделирования в графическом и текстовом виде;
- стохастическое моделирование параметров и характеристик и обеспечение возможности проведения статистического вычислительного эксперимента;
- организацию и поддержку информационной базы по исходным данным для основных глубоких шахт;
- хранение в графической библиотеке специальных объектов, представляющих собой модели горных выработок, адаптированные под специфические условия каждой глубокой шахты;

- возможность графической компоновки ветвей вентиляционных сетей шахты, включающих выемочные участки, воздухоподающие и вентиляционные выработки, а также систему охлаждения шахтного воздуха;
- возможность автономной отладки отдельных компонентов и объектов модели.

Представленная структурная схема и основные сформулированные функции предполагают организацию модели по иерархическому принципу. На верхнем уровне иерархии условно выделены горные выработки как объекты регулирования теплового режима и система охлаждения воздуха. На более низком уровне выделены подсистемы, реализующие основную математическую модель прогноза тепловлажностных параметров вентиляционного воздуха для каждого вида горной выработки. На самом низком уровне выделены подпрограммы, задающие различные параметры и характеристики модели, представляемые в виде простейших блок-диаграмм.

Поставленные в работе задачи и предложенные принципы моделирования позволяют реализовать при прогнозе теплового режима глубоких шахт современную технологию компьютерного моделирования, ориентированную на применение графического языка блок-диаграмм системы Matlab-Simulink.

2.2 Разработка компьютерной модели для описания процессов тепломассообмена между шахтным воздухом и горной средой

Указанные в предыдущих разделах закономерности формирования тепловлажностных параметров воздуха в горных выработках и принципы моделирования позволили разработать следующую математическую модель для описания тепломассообменных процессов в горных выработках глубоких шахт. Основой модели является преобразованное к безразмерному виду уравнение массового баланса (2.1) вида

$$\frac{d\Theta_n}{d\eta} = 2 \frac{Nu_D}{Sc Re} (\Theta_H(t_s) - \Theta_n); \quad \eta = 0 \quad \Theta_n = 0, \quad (2.2)$$

где $\eta = \frac{y}{R_0}$; $d = 2R_0$; Sc - число Шмидта; $\Theta_n = \rho_n - \rho_0$;

$$\Theta_H(t_s) = \rho_H(t_s) - \rho_0.$$

Зависимость (2.2) дополним закономерностями (1.4) и (1.5), а также следующими термодинамическими соотношениями для влажного воздуха

$$i = 1,005 \cdot t + (2500 + 1,927 \cdot t) \cdot x; \quad (2.3)$$

$$x = 0,622 \frac{P_n}{B - P_n}; \quad (2.4)$$

$$P_n = \rho_n \cdot R_n \cdot (t + 273); \quad (2.5)$$

$$P_H(t) = 1,675 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(-\frac{5300}{273 + t}\right); \quad (2.6)$$

$$\varphi = P_n / P_H(t), \quad (2.7)$$

где $P_n, P_H(t)$ - парциальное давление водяного пара и насыщенного водяного пара в атмосферном воздухе при температуре t ; $R_n = 461,43 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^\circ\text{К}}$ - индивидуальная газовая постоянная водяного пара.

Приведенная модель является нелинейной гибридной системой, т.к. состоит из ряда алгебро-дифференциальных уравнений и может быть решена численно. Для решения системы уравнений разработана имитационная модель с использованием принятой в предыдущем разделе объектно-ориентированной технологии, позволяющей применять для описания процессов стандартные блоки и функциональные схемы (Matlab – Simulink). Компьютерная модель реализована в среде визуального моделирования Simulink.

Структура компьютерной модели для воздухоподающей (вентиляционной) выработки в виде графической блок-диаграммы Simulink представлена на рисунке 2.2. Аналогичная структура компьютерной модели

для очистной выработки представлена на рисунке 2.3. Модели в целом похожи между собой, для построения моделей использовались, в основном, объектные блоки “Sybsystem”.

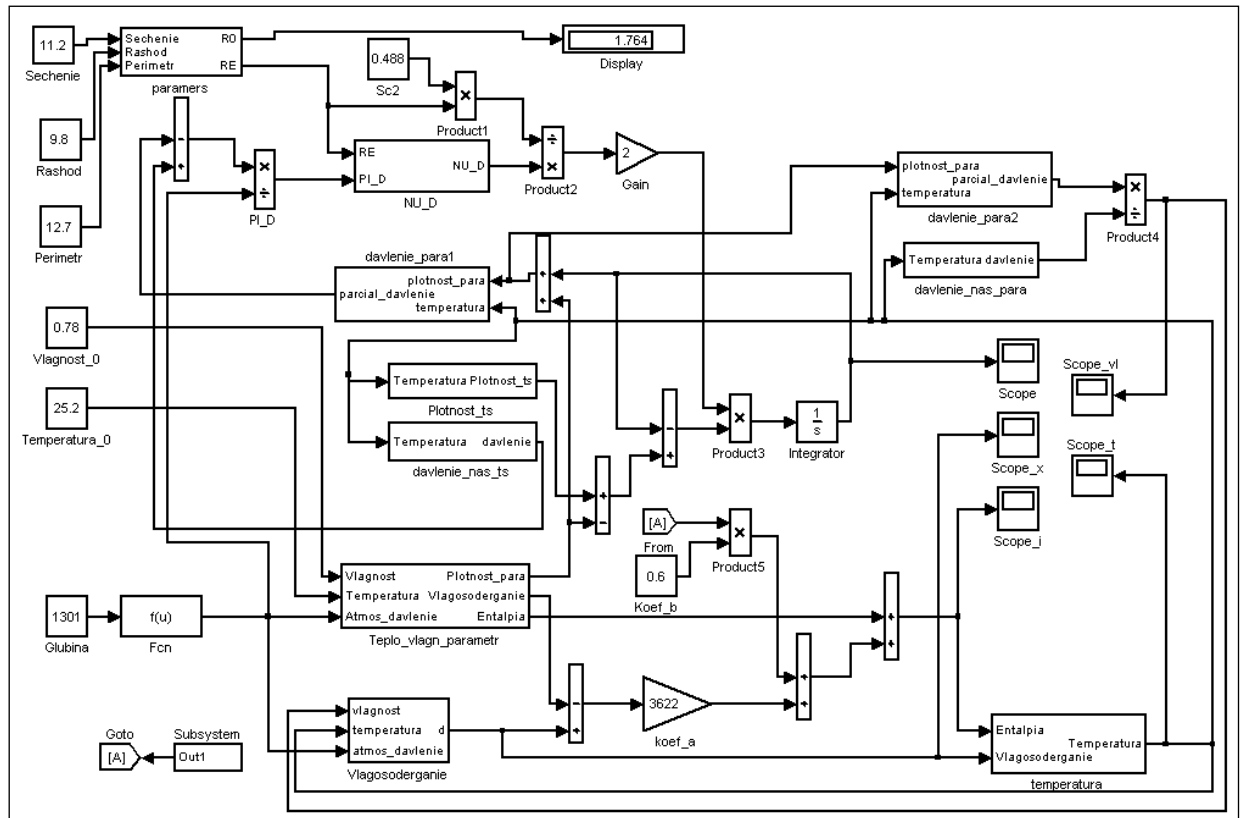


Рисунок 2.2 – Графическая блок-диаграмма компьютерной модели “Воздухоподающая выработка”

На этапе отладки моделей (Рис. 2.2) исходные данные вводились блоками “Sources”: сечение - “Sechenie”, расход - “Rashod”, периметр - “Perimetr” и т.д. По исходным данным в подпрограмме “Parametrs” определялись эквивалентный диаметр (R0) и число Рейнольдса (RE), в подпрограмме “Teplo_vlag_n_parametrs” определялась энтальпия, влагосодержание и плотность водяного пара на входе в выработку с учетом уравнений (2.3) - (2.7). Графическая блок-диаграмма Simulink этой подпрограммы приведена на рис. 2.4. В подпрограмме “Plotnost_ts” по уравнению (2.6) согласно [64] определяется плотность насыщенных водяных паров при температуре стенки t_s . Сигнал поступает на сумматор Sum_1, где

преобразовывается в сигнал $\Theta_H(t_s)$ и направляется далее на сумматор *Sum_2* и на умножитель *Product3*. После выхода из умножителя создан сигнал представляющий собой правую часть уравнения (2.2), который подается на интегратор. После интегратора сигнал Θ_n преобразуется в ρ_n в сумматоре *Sum_3* и разделяется.

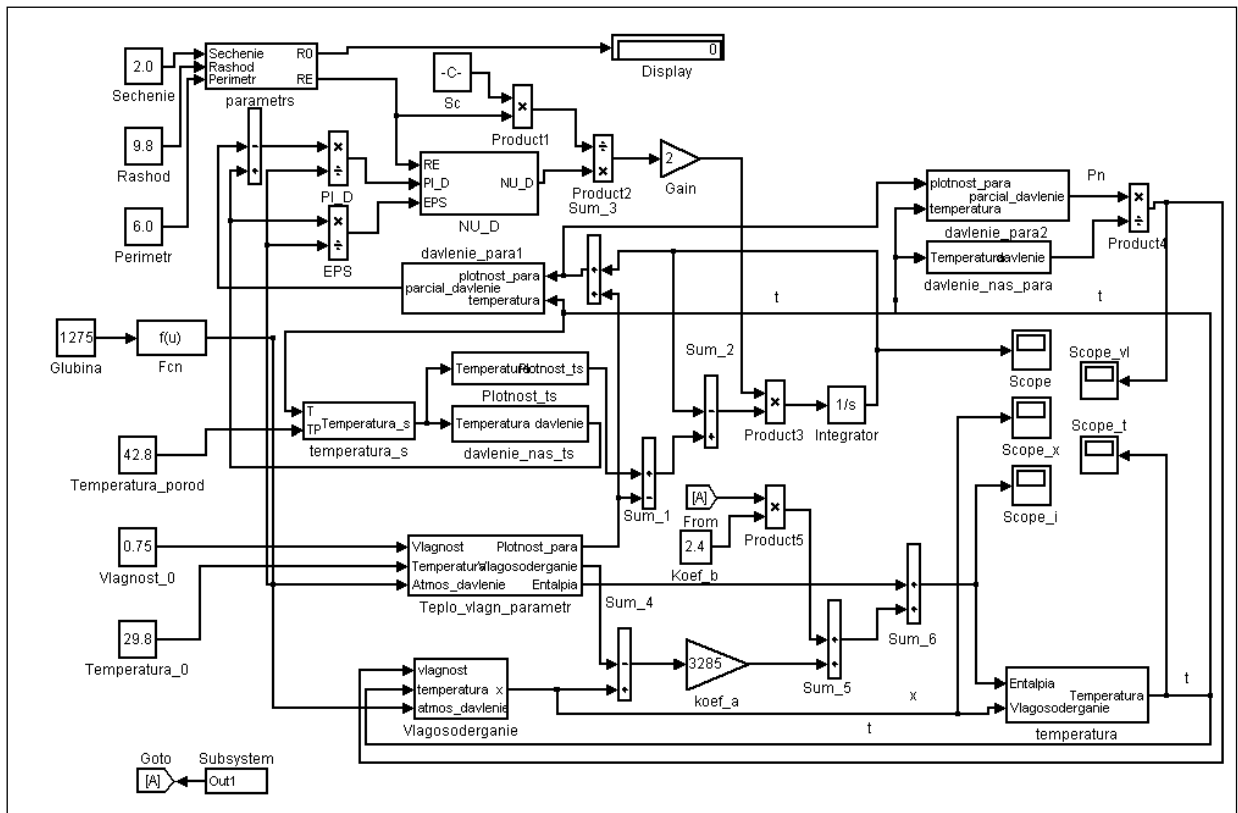


Рисунок 2.3 – Графическая блок-диаграмма компьютерной модели “Очистная выработка”

Первый сигнал ρ_n подается на подпрограмму “*Davlenie_para1*” для расчета P_n и далее на блок модулей и подпрограмму *NuD* для расчета числа Nu_D согласно (1.5) и для расчета коэффициента $2 \frac{Nu_D}{Sc Re}$, после чего преобразованный сигнал идет на умножитель *Product3*.

Второй сигнал поступает на подпрограмму “*Davlenie_para2*”, где по входным сигналам температуры и величины ρ_n определяется парциальное

шести различных подпрограмм для замыкания компьютерной модели. Сигналы t, φ, i, x и Θ_n подаются на группу осциллографов *Scope*.

Компьютерные модели настраивались для конкретных глубоких шахт. Проверка адекватности разработанной модели осуществлялась по экспериментальным данным МакНИИ, собранным по глубоким шахтам в 1980-1996 гг. Данные были предоставлены научным руководителем и сотрудником МакНИИ Яковенко А.К. Объем данных включал более 100 тепловых съемок, выполненных на выемочных участках основных глубоких шахт Донбасса без охлаждения воздуха. По экспериментальным данным компьютерная модель каждого вида горной выработки путем задания средних значений постоянных коэффициентов в уравнениях (1.4) и (1.5) настраивалась на тепловые режимы основных глубоких шахт Донбасса. Настройка осуществлялась путем определения коэффициентов a и b в уравнении (1.4) и подбора коэффициента A в уравнении (1.5) Данные параметры для основных глубоких шахт Донбасса приведены в таблице 2.1, при этом учитывалось совпадение данных расчета с экспериментом, интенсивность изменения относительной влажности по длине выработки и качественный вид зависимостей для температуры, относительной влажности, влагосодержания и энтальпии.

После настройки модели выполнен комплекс прогнозных расчетов, который показал хорошую адекватность предложенного метода моделирования. Средняя погрешность определения температуры воздуха на выемочных участках глубоких шахт составляет $0,2 \div 0,3^\circ\text{C}$, влагосодержания $0,4 \div 0,5$ г/кг. Точность модели составляет 1-2% по основным прогнозным показателям – температуре, влагосодержанию и энтальпии и до 3-4% по относительной влажности. Поэтому предложенная модель может быть использована при прогнозе климатических условий на выемочных участках.

На рисунке 2.5 для примера приведены графики изменения тепловлажностных параметров воздуха построенные по результатам моделирования процессов тепломассопереноса в 7 западном яруском

конвейерном штреке шахты Шахтерская-Глубокая. На рисунке 2.6. приведены графики изменения тепловлажностных параметров воздуха для 7 лавы Центрального блока шахты Шахтерская-Глубокая, этого же выемочного участка

Таблица 2.1. -

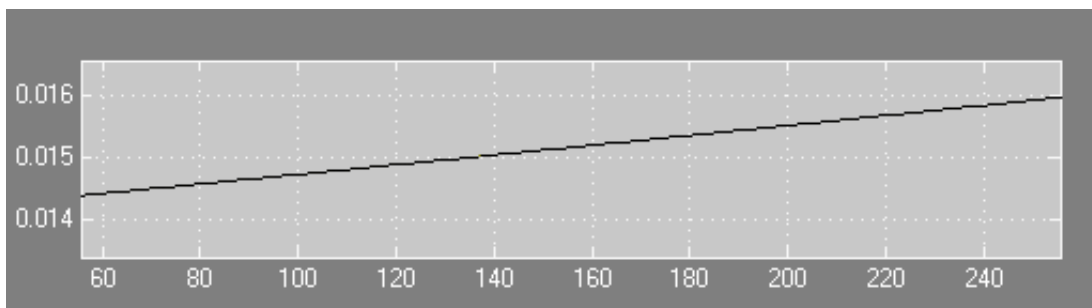
Параметры уравнений (1.4) и (1.5) для некоторых глубоких шахт Донбасса для настройки компьютерных моделей

Шахта	Вид горной выработки	Значения коэффициентов в уравнении (2.4)		Значения коэффициента $A \cdot 10^{-4}$ в уравнении (2.5)
		a	b	
им. Челюскинцев	Воздухоподающая	2680,0	2,27	3,0
	Очистная	3150,0	2,00	9,0
«Грудовская»	Воздухоподающая	2800,0	1,90	6,5
	Очистная	3340,0	2,50	14,5
им. Скочинского»	Воздухоподающая	2560,0	2,40	5,0
	Очистная	3850,0	1,0	16,5
«Глубокая»	Воздухоподающая	2440,0	0,42	2,0
	Очистная	3070,0	4,34	8,5
им. Бажанова	Воздухоподающая	3340,0	2,56	5,5
	Очистная	3045,0	3,24	17,5
им. Стаханова	Воздухоподающая	2500,0	3,10	5,5
	Очистная	2860,0	4,05	8,0
им. Засядько	Воздухоподающая	2470,0	2,83	3,9
	Очистная	4220,0	- 2,90	9,5
«Прогресс»	Воздухоподающая	2790,0	2,50	4,0
	Очистная	3240,0	2,20	11,0
«Шахтерская-Глубокая»	Воздухоподающая	3210,0	3,60	2,5
	Очистная	2990,0	2,33	15,5

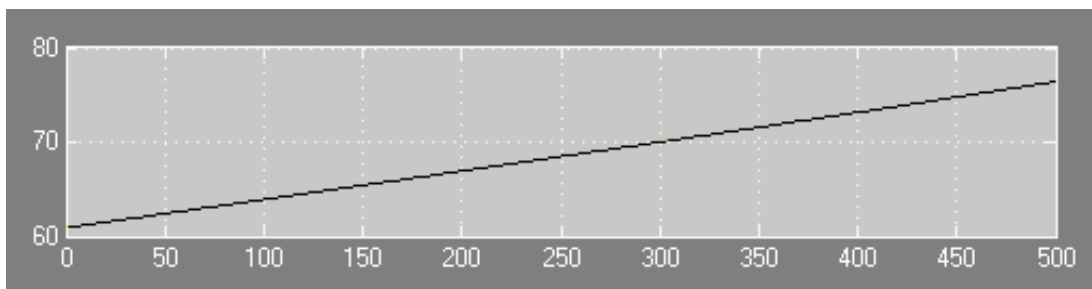
Численный анализ моделей показал, что для воздухоподающих выработок характер изменения влагосодержания, энтальпии и температуры от длины выработки чаще всего имеет линейный вид, а зависимость относительной влажности близка к линейной или отличается умеренно выраженной нелинейностью. Для очистных выработок характер изменения влагосодержания обычно линейный, функция изменения энтальпии имеет слабо выраженную нелинейность, зависимости температуры и относительной влажности имеют явно выраженную нелинейность. Для вентиляционных выработок зависимости обычно имеют практически линейный вид.

Адаптированные по экспериментальным данным компьютерные модели горных выработок для основных глубоких шахт представлены в виде объектных модулей графической библиотеки *Simulink*.

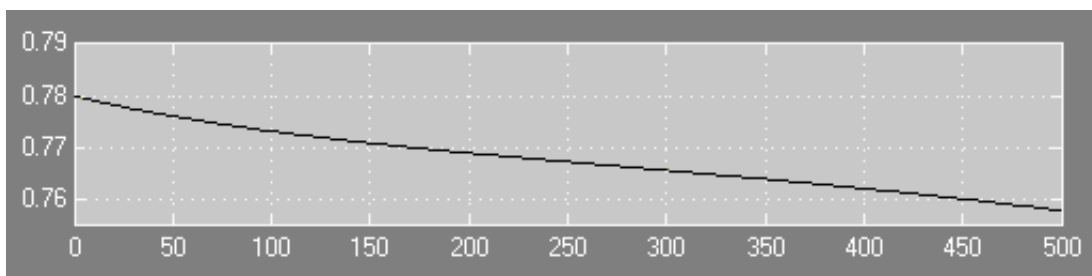
Предложенная модель отличается высокими возможностями по адекватному описанию процессов тепломассообмена на конкретных глубоких шахтах и изучению закономерностей процессов в численной реализации.



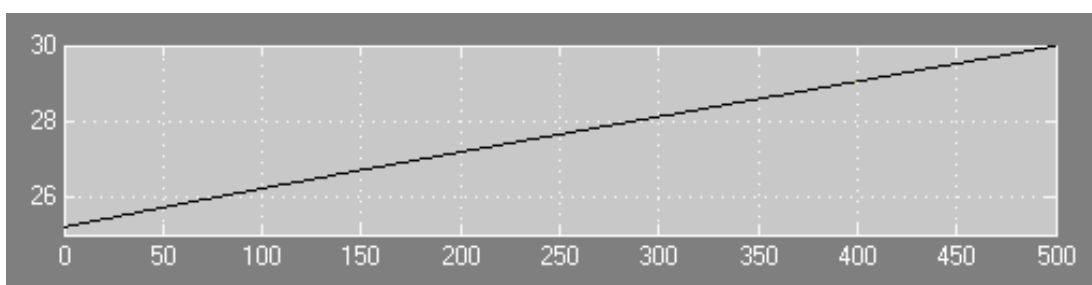
а)



б)

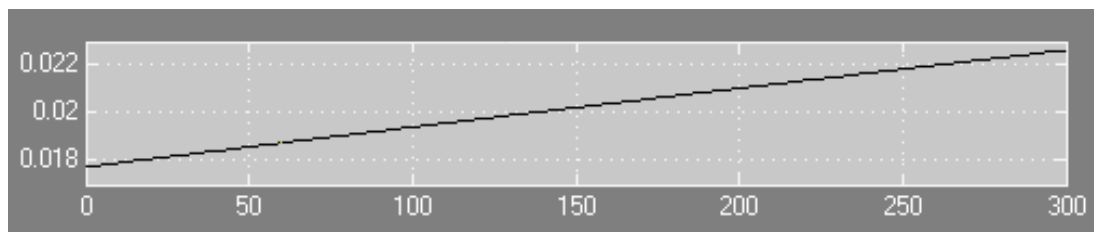


в)

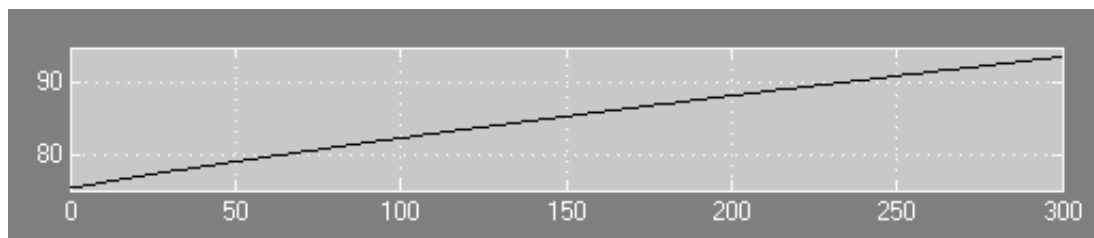


г)

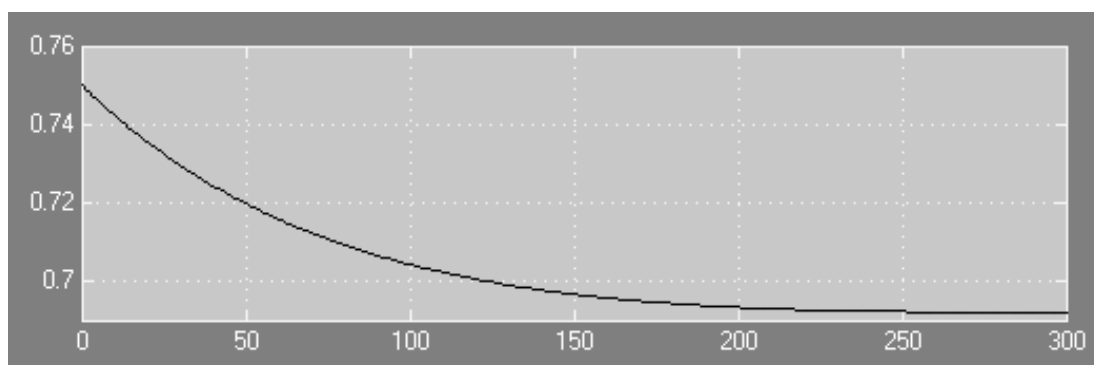
Рисунок 2.5. – Графики изменения тепловлажностных параметров воздуха в 7 западном ярусном конвейерном штреке шахты Шахтерская-Глубокая: а – влагосодержание; б – энтальпия; в – относительная влажность; г – температура.



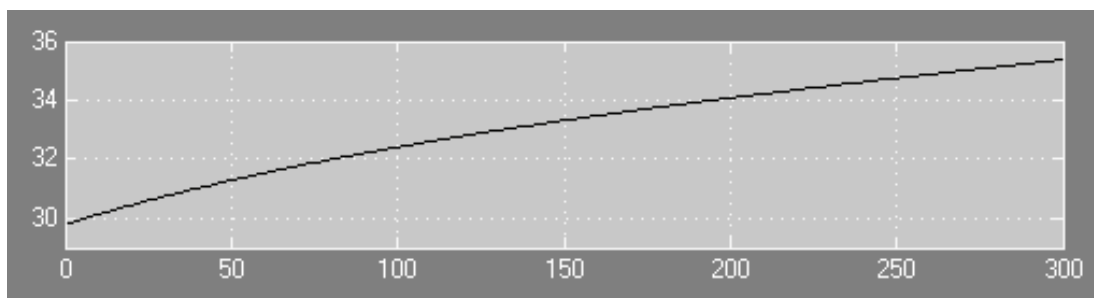
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.6. – Графики изменения тепловлажностных параметров воздуха для 7 лавы Центрального блока шахты Шахтерская-Глубокая: а – влагосодержание; б – энтальпия; в – относительная влажность; г – температура.

2.3 Выводы по разделу

1. На основании обобщения закономерностей формирования тепловых условий в горных выработках глубоких шахт предложена методика построения компьютерных моделей, предполагающая численную реализацию прогнозных алгоритмов с использованием объектно-ориентированной технологии моделирования процессов тепломассопереноса в шахтах. Показано, что использование статистических закономерностей, характеризующих процесс тепломассообмена, совместно с компьютерными методами визуального и имитационного моделирования, позволяет быстро и эффективно построить модель теплового режима выемочного участка для конкретной шахты.

2. Впервые предложены компьютерные модели для описания процессов тепломассопереноса на выемочных участках глубоких шахт, реализованные в графической среде визуального моделирования Simulink. Сформулированы принципы построения таких моделей и основные функции, требующие реализации в процессе проектирования. Разработаны стандартные блоки и графические блок-диаграммы для расчета тепловлажностных параметров воздуха на выемочных участках для основных видов горных выработок. Компьютерные модели и блоки представлены в виде библиотеки графических модулей и адаптированы под тепловой режим каждой из основных 15 глубоких шахт Донбасса. Предложенный подход существенно снижает трудоёмкость моделирования, повышает достоверность моделей и увеличивает точность тепловых прогнозов.

3. Показано на примере построения иерархических блок-диаграмм с использованием библиотеки графических модулей, что использование технологии визуального моделирования в среде Matlab - Simulink позволяет эффективно строить модели достаточно сложных физических систем вида “производственная среда – техника нормализации микроклимата”.

Предложены компьютерные модели выемочного участка с искусственным охлаждением рудничного воздуха, в которых графические блок-диаграммы моделей теплового режима горных выработок и средств охлаждения воздуха объединены в среде Simulink в одну гибридную нелинейную систему. Данные компьютерные модели позволяют проводить вычислительный эксперимент на виртуальном стенде и открывают ряд новых возможностей в исследовании процессов тепломассообмена на выемочных участках глубоких шахт.

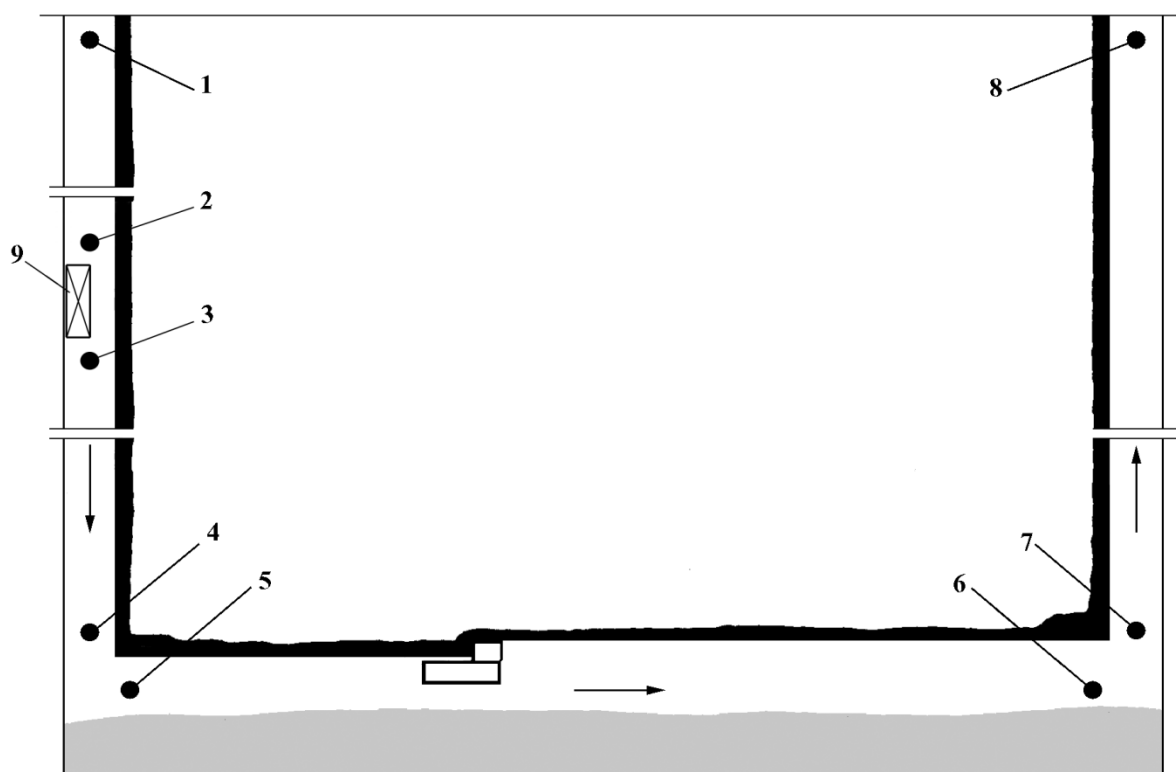
3 АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕПЛОМАССООБМЕНА НА ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКАХ ПРИ КОНДИЦИОНИРОВАНИИ РУДНИЧНОГО ВОЗДУХА

3.1 Методика и характеристика объектов исследования

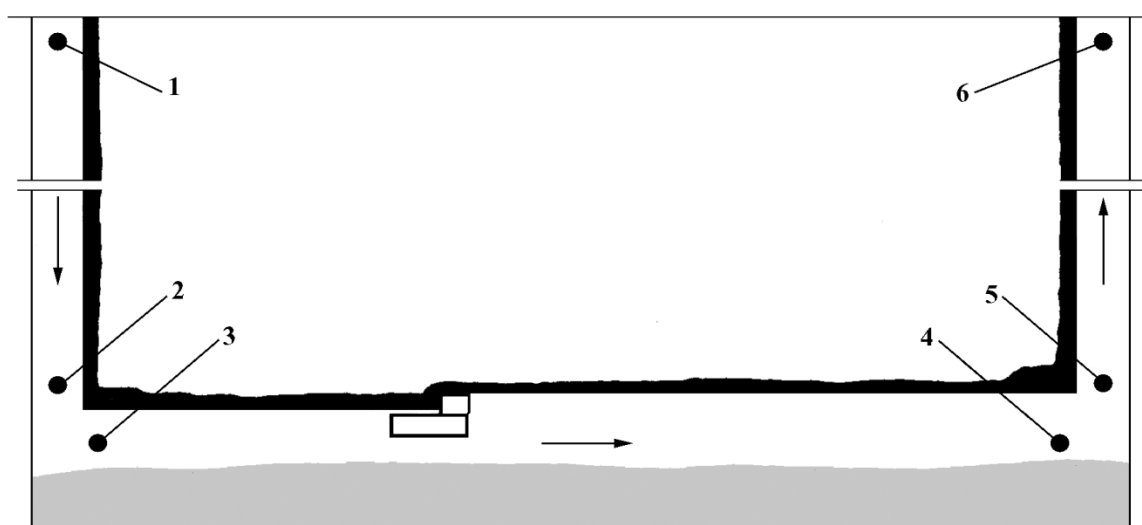
Задачами экспериментальной части работы являлось:

- изучение тепловых условий в горных выработках выемочных участков глубоких шахт как при искусственном охлаждении, так и без охлаждения рудничного воздуха и проведение сравнительного анализа процессов тепломассообмена;
- статистический анализ собранных шахтных экспериментальных данных и изучение закономерностей тепломассообмена на выемочных участках при обработке рудничного воздуха;
- установление зависимостей, характеризующих процессы тепломассообмена в горных выработках, для адаптации разработанных компьютерных моделей прогноза тепловлажностных параметров вентиляционного воздуха;
- исследование вероятностных законов распределения горнотехнических параметров выемочных участков и тепловлажностных параметров вентиляционного воздуха для оценки условий проведения вычислительных экспериментов;

Исходя из поставленных задач, в качестве объектов исследования выбирались выемочные участки глубоких шахт для которых имелись тепловые съемки на всем протяжении вентиляционной струи от начала воздухоподающей выработки до конца вентиляционной выработки. Схема расположения замерных пунктов и измеряемые параметры вентиляционного воздуха приведены на рис. 3.1.



а)



б)

Рисунок 3.1. - Схема расположения замерных пунктов и измеряемые параметры вентиляционного воздуха при проведении тепловых съемок на выемочном участке.

а – при охлаждении рудничного воздуха; б – без охлаждения рудничного воздуха; 1 – 8 точки замеров тепловлажностных параметров и расхода воздуха; 9 – воздухоохладитель.

Методика проведения тепловых съемок в горных выработках и обработки результатов определена руководящим документом и является общепринятой. Результаты тепловых съемок обрабатывались по зависимостям, приведенным в данном руководстве и подразделе 2.2. Величина парциального давления насыщенного водяного пара рассчитывалась согласно (2.6), а энтальпия и влагосодержание влажного воздуха согласно формул (2.3) и (2.4). Барометрическое давление воздуха в исследуемой горной выработке определялось согласно формулы

$$B = B_0 + 12.0 * H \quad (3.1)$$

где B_0 – барометрическое давление воздуха на поверхности шахты, Па; H – глубина расположения точки замера от дневной поверхности, м.

Температура горных пород определялась согласно методик расчета.

Шахты и выемочные участки выбирались из условия репрезентативного представления всех глубоких шахт.

Исходя из поставленных задач экспериментальных исследований, было отобрано для последующей статистической обработки данных более 100 тепловых съемок на 40 выемочных участках глубоких шахт. Результаты тепловых съемок предоставлены руководителем и лабораторией кондиционирования рудничного воздуха МакНИИ. Указанные выемочные участки отличались отработкой пологих и наклонных пластов мощностью от 0,7 до 1,7 м на глубине от 600 до 1300 м по сплошной и столбовой системам разработки. Проветривание участков осуществлялось преимущественно по прямоточной и возвратноточной схемам проветривания. Управление горным давлением проводилось полным обрушением. Горные породы представлены сланцами, песчаниками и известняками. Температура горных пород в выборке наблюдений составляла 25÷43°C, расход воздуха на проветривание участков был в пределах 400÷1500 м³/мин. Длина участковых воздухоподающих и вентиляционных выработок составляла 300÷1500 м, длина лав 140÷240 м, а нагрузка на очистной забой от 300 до 1500 т/сут.

Среди выемочных участков с искусственным охлаждением воздуха для последующей статистической обработки данных было отобрано более 50 тепловых съемок на 23 выемочных участках глубоких шахт. Характеристика данной выборки наблюдений отличается меньшими диапазонами изменения основных параметров, характеризующих выемочные участки, но, в целом, соответствует той, что приведена выше.

Собранный объем статистических данных позволил изучить закономерности формирования процессов тепломассообмена на выемочных участках при кондиционировании рудничного воздуха и провести сравнительный анализ формирования тепловых режимов в различных условиях.

3.2 Вычислительные эксперименты и статистический анализ шахтных экспериментальных данных

В настоящее время глубокие шахты пологого падения разрабатывают в основном один - два пласта, вскрытие шахтных полей осуществлено вертикальными стволами, геотермальная ступень составляет $32,0 \div 47,9$ м/°С.

Проветривание шахт осуществляется по комбинированной, фланговой и центральной схемам. В свою очередь проветривание лав осуществляется по возвратноточным схемам. Широко применяется механизация процессов добычи угля. Суточная нагрузка на лавы колеблется в широких пределах и в среднем составляет $300 \div 800$ т/сут. На выемочные участки поступает $12 \div 20,0$ м³/с воздуха.

Сечение главных квершлагов и групповых откаточных и вентиляционных штреков составляет $13 \div 16,0$ м², сечение уклонов, бремсбергов и выемочных штреков - $10,0 \div 13,0$ м².

Исходя из принятой объектно-ориентированной технологии моделирования, систему «выемочный участок – техника нормализации микроклимата» можно на верхнем уровне представить состоящей из двух

видов графических объектов – компонентов, представляющих горные выработки, и модулей, представляющих элементы системы обработки шахтного воздуха.

Приведенные графические диаграммы Simulink компьютерных моделей «Воздухоподающая выработка» и «Очистная выработка» стали основой для разработки модели описания процессов тепломассообмена на выемочных участках глубоких шахт. Соответствующая блок-диаграмма компьютерной модели выемочного участка приведена на рис. 3.7. Пункт охлаждения воздуха (воздухоохладитель) представлен объектом «ВО» модель которого описана ниже.

На рис. 3.3 представлена упрощенная схема ветви подземной сети хладоносителя стационарной холодильной установки. Из рисунка видно, что подземная сеть хладоносителя для глубоких шахт Донбасса состоит из ряда типичных участков. Усредненный анализ шахтной системы кондиционирования может быть выполнен на основе расчета ветви системы кондиционирования воздуха для горногеологических и горнотехнических условий конкретных шахт. Обычно ветвь включает в себя теплообменник высокого давления или подземную холодильную установку (2), размещенную в подземной камере (1), основные и участковые трубопроводы хладоносителя (3) и воздухоохладители (4), установленные на выемочных участках (рис. 3.3).

В процессе расчета параметров воздуха при его обработке использовались следующие термодинамические соотношения.

Энтальпия воздуха после климатической установки и в воздухоподающей выработке определяется по формулам

$$i_{\text{вo}} = i_0 - \frac{Q_0}{G_{\text{вo}}} \quad (3.8)$$

$$i_1 = \frac{i_0 \cdot (G - G_{\text{вo}}) + i_{\text{вo}} G_{\text{вo}}}{G}. \quad (3.9)$$

Здесь i_0, i_1 - энтальпия воздуха в выработке до и после воздухоохладителя; Q_0 - холодильная мощность воздухоохладителя; G_{60}, G - весовой расход воздуха через воздухоохладитель и в выработке.

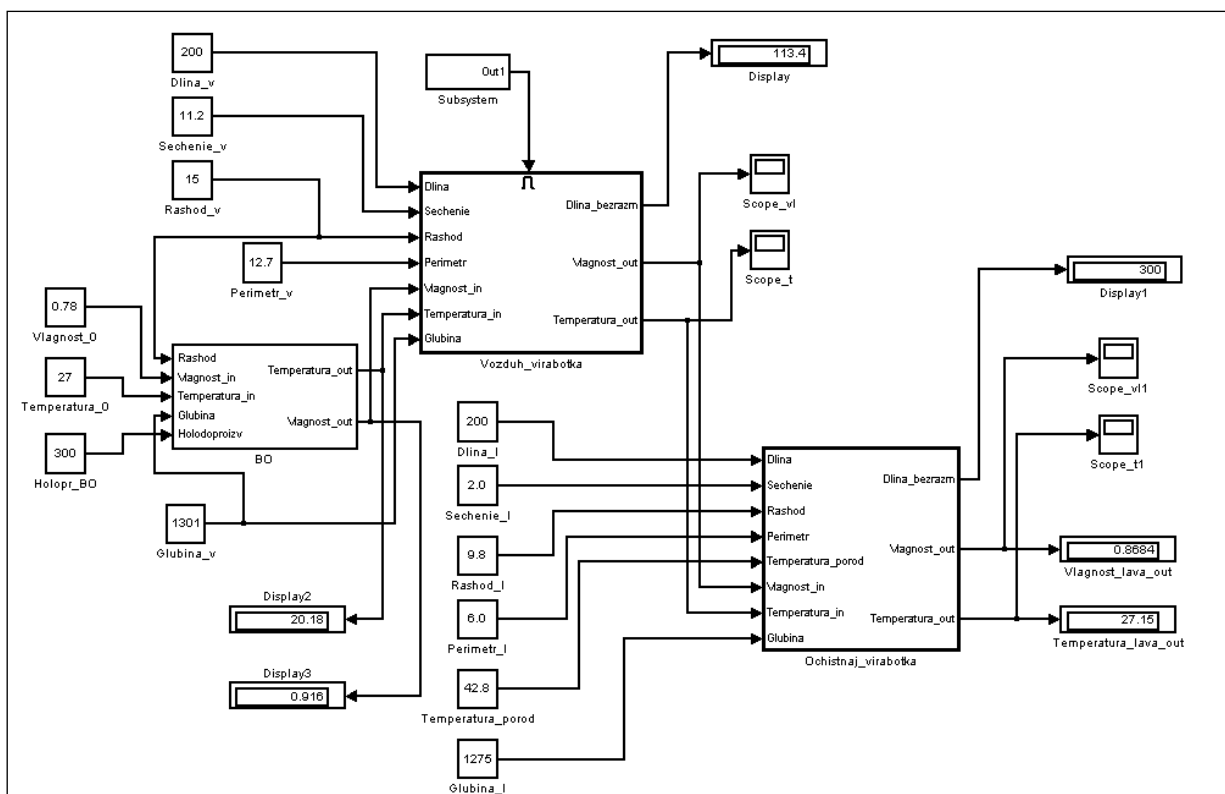


Рисунок 3.2 - Графическая блок-диаграмма компьютерной модели выемочного участка шахты.

Проведенными МакНИИ исследователями экспериментально установлено, что влажность воздуха на выходе у воздухоохладителей, развивающих высокую холодопроизводительность, составляет $\varphi = 0,95 \div 1,0$.

Расчет по уравнениям (3.8) и (3.9) при использовании необходимых блоков и модулей реализован в подпрограмме ВО компьютерной модели выемочного участка шахты. Графическая диаграмма модели воздухоохладителя приведена на рис. 3.4.

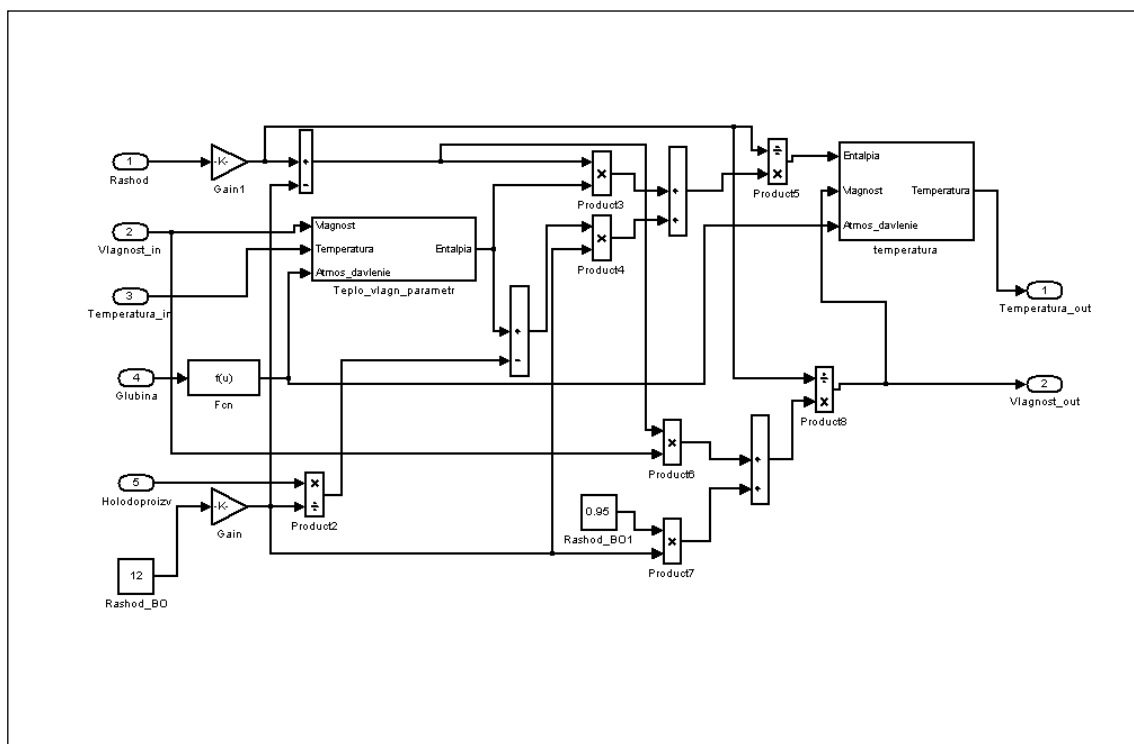


Рисунок 3.4. – Графическая блок-диаграмма компьютерной модели пункта обработки воздуха.

На основе приведенной выше компьютерной модели с учетом исходных данных выполнены расчеты по прогнозу тепловых условий на выемочных участках глубоких шахт. При расчете определялись параметры воздуха на входе и на выходе очистной выработки для различных условий. Объектные модели для каждой шахты настраивались по данным шахтных исследований.

Кроме того, для указанных исходных данных выполнялись расчеты необходимой холодопроизводительности средств охлаждения воздуха при обеспечении требуемых тепловых условий в лавах. Характеристики и параметры ветви принимались следующие: количество лав – 2; длина участков воздухоподающих выработок – 1000-1500 м; скорость воздуха 1,0-1,5 м/с; диаметр трубопроводов хладоносителя 100-150 мм. Длина уклонов и бремсбергов 500-1000 м, скорость воздуха 3,0-4,5 м/с, диаметр трубопроводов хладоносителя 150-200 мм. Длина группового откаточного

штрека - 2000 м, скорость воздуха 8-10 м/с, диаметр трубопроводов хладоносителя 200-250 мм. Длина воздухоподающего квершлага 700-1000 м, скорость воздуха 10-15 м/с, диаметр трубопроводов хладоносителя 250-300 мм.

Расчет трубопроводов хладоносителя.

$$t_{2i} = t_{1i} e^{-\frac{\pi K_i D_i L_i}{C_w G}} + \left(t_{1i} + \frac{8\lambda G}{\pi^3 \rho^2 D_{iвн}^5 K_i D_i} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi K_i D_i L_i}{C_w G}} \right) \quad (3.10)$$

$$Q_i = C_w G \cdot (t_{2i} - t_{1i}) \quad (3.11)$$

где t_{2i} , t_{1i} - конечная и начальная температура хладоносителя на участке I, °C; G_p - расход хладоносителя, кг/с; t_i - средняя температура вентиляционной струи в выработке, °C; D_i , L_i - наружный диаметр и длина трубопровода на участке I, м; $D_{iвн}$ - внутренний диаметр трубопроводов, м; λ - коэффициент Дарси трубопровода; C_w , ρ - теплоемкость и плотность хладоносителя, кДж/кг°C и кг/м³.

Коэффициент теплопередачи трубопровода рассчитывается по следующей формуле:

$$K_i = \frac{1}{\frac{D_i}{2\lambda_u} \ln\left(\frac{D_i}{D_i - 2\sigma_u}\right) + \frac{D_i^{0,2}}{3,66 V_{bi}^{0,8}}} \quad (3.12)$$

Здесь λ_u , σ_u - теплопроводность и толщина слоя теплоизоляции трубопровода, Вт/м°C, м; V_{bi} - скорость среды на участке I.

Алгоритм расчета ветви кондиционирования воздуха реализован в соответствующей подпрограмме SYSTEM (рис. 3.5).

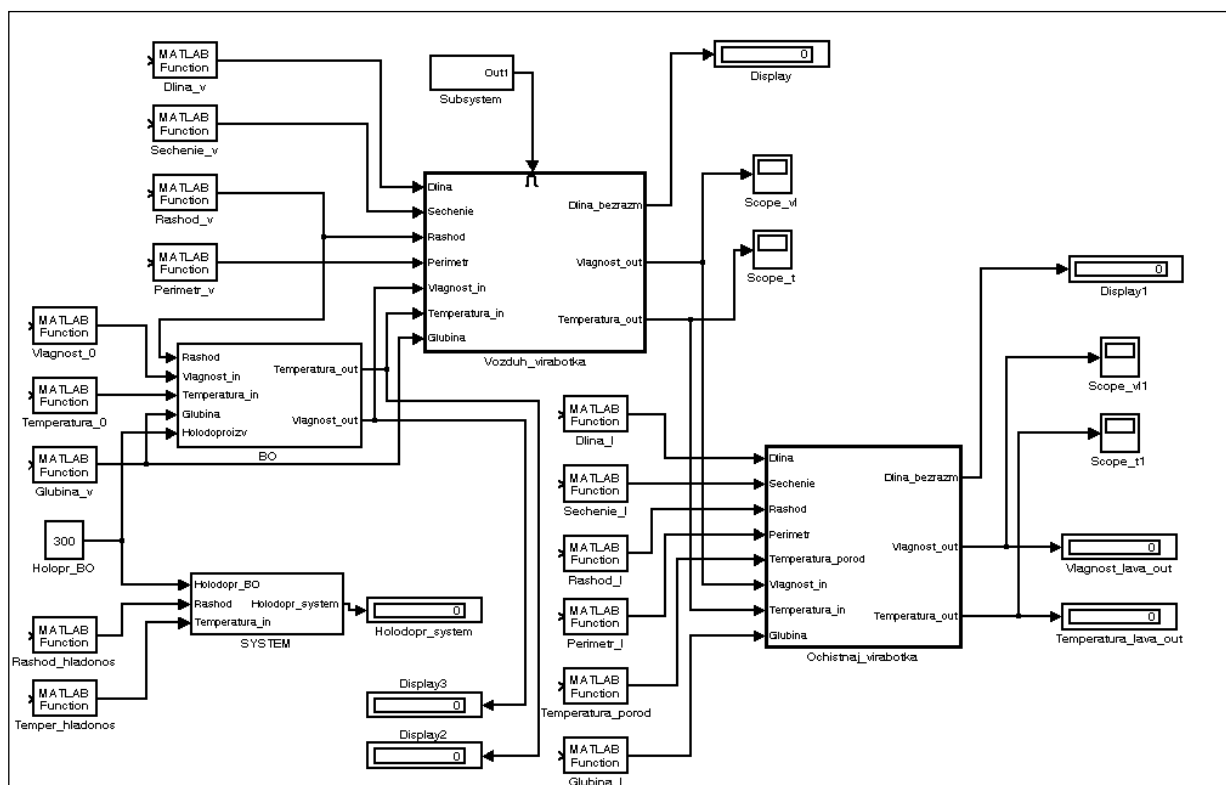


Рисунок 3.5. Имитационная модель системы «производственная среда - техника нормализации микроклимата» для выемочных участков глубоких шахт в среде Simulink.

Соответствующая имитационная модель системы “производственная среда – техника нормализации микроклимата” для выемочных участков глубоких шахт в среде Simulink, представленная на рис. 3.10, предполагает задание исходных данных в виде статистических распределений, которые определяются блоками *Matlab Function*. Основная масса исходных данных задавалась в виде нормальных распределений с использованием М – функций системы Matlab *normrnd*. Некоторые исходные данные, такие как температура и расход хладонотителя, диаметры и длины трубопроводов и т.д., отличающиеся узкими диапазонами изменения переменных, задавались или константами или в виде равномерных распределений с использованием функций *unifrnd*. В представленной модели блоки “BO”, “Воздухоподающая выработка” и “Очистная выработка” включены по сигналам температуры и

относительной влажности воздуха последовательно, блок “*SYSTEM*” включен по управляющему сигналу “*ВО*” параллельно.

Таким образом, предложенная модель прогноза тепловлажностных параметров воздуха может быть использована на выемочном участке. Однако, для настройки модели под условия конкретных глубоких шахт при обработке рудничного воздуха и определения необходимых данных и параметров модели требуется проведение шахтных исследований и статистический анализ результатов. Исследованию данного вопроса и посвящена, в основном, экспериментальная часть диссертационной работы.

3.3 Выводы по разделу

1. На основе статистических данных установлены зависимости, характеризующие приращения энтальпии от изменений влагосодержания влажного воздуха для воздухоподающих, очистных и вентиляционных выработок выемочных участков основных глубоких шахт.

2. Изучены вероятностные распределения горнотехнических параметров выемочных участков глубоких шахт и тепловлажностных параметров воздуха по пути движения вентиляционной струи.

3. Показано, что относительная влажность воздуха на входе и выходе воздухоподающих, очистных и вентиляционных выработок подчиняется нормальному закону вероятностного распределения. Температура воздуха удовлетворяет этому условию только на входе воздухоподающих выработок выемочных участков. Установленные законы вероятностных распределений могут быть использованы при проведении имитационных вычислительных экспериментов

.

4. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СРЕДСТВ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ НОРМАЛИЗАЦИИ МИКРОКЛИМАТА НА ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКАХ ГЛУБОКИХ ШАХТ

4.1. Определение исходных данных и проведение вычислительных экспериментов.

Полученные экспериментальные данные по тепловому режиму, горнотехническим и горногеологическим параметрам глубоких шахт использовались при проведении вычислительных экспериментов на компьютерных моделях в процессе установления параметров предложенных технических решений. Основные результаты исследований сводятся к следующему.

Как показала экспериментальная оценка видов статистических распределений, температура и относительная влажность воздуха на входе в воздухоподающую выработку подчиняется нормальному закону. При имитационном моделировании соответствующее распределение было представлено нормально распределённым генератором случайных чисел. Таким же образом, моделировались основные исходные данные – длины, сечения и периметры выработок, расходы вентиляционного воздуха и т.д. Возможное отклонение данных величин (среднеквадратичные отклонения) от средних значений принимались следующими: длины воздухоподающих и вентиляционных выработок - $\pm 10 \div 20$ м; длина очистной выработки - $\pm 5 \div 20$ м; сечения выработок - $\pm 10 \div 20$ %; сечение лавы - $\pm 5 \div 10$ %; глубина - $\pm 20 \div 30$ м; температура пород - $\pm 1^\circ\text{C}$; расход воздуха - $\pm 10 \div 20$ %;

Распределения некоторых горнотехнических данных моделировались с помощью равномерно распределенных генераторов случайных чисел в диапазоне минимального и максимального значений для конкретной шахты.

Параметры, характеризующие процессы тепломассообмена на выемочных участках задавались с учетом выполненного в разделе 3.2. статистического анализа экспериментальных данных. Это позволило настроить компьютерные модели, разработанные в главе 2 (рис. 2.10) под горнотехнические условия конкретных глубоких шахт. Для оценки необходимой холодопроизводительности системы кондиционирования шахтного воздуха с учетом уравнений (2.10) – (2.12) разработана подпрограмма расчета ветви системы охлаждения в виде модуля SYSTEM.

Разработанная в главе 2 компьютерная модель, которая приведена на рис. 2.10, позволяет проводить вычислительные эксперименты на виртуальном стенде, представляющим собой имитационную модель системы «производственная среда – техника нормализации микроклимата» для глубоких шахт.

Схема проведения вычислительных экспериментов на компьютерной модели предполагала первоначально «настройку» модели под конкретные условия выемочных участков глубоких шахт, путем задания требуемых исходных данных и параметров модели. После этого осуществлялась проверка адекватности модели по результатам сравнения расчетных значений температуры и относительной влажности воздуха в характерных точках выемочного участка с экспериментальными данными тепловых съемок на данной шахте. Далее в вычислительном эксперименте определялась температура воздуха на выходе из очистной выработки в зависимости от величины холодопроизводительности воздухоохладителя на входе в лаву. Расчеты выполнялись с шагом увеличения холодопроизводительности 20-30 кВт.

Приведенная схема вычислительного эксперимента потребовала осуществления на этапе окончательных расчетов от 20 до 40 прогонов модели для среднестатистических данных выемочных участков по каждой конкретной шахте. Вычислительные эксперименты проводились как для условий достигнутой глубины ведения горных работ, так и для максимально

возможной. В целом, было осуществлено более 1000 прогонов компьютерной модели на этапе вычислительных экспериментов.

Из приведенных данных видно, что для большинства выемочных участков глубоких шахт необходимая холодопроизводительность средств охлаждения воздуха, обеспечивающая на выходе из лавы температуру воздуха не выше 26 °С, составляет 300÷500кВт.

Из результатов вычислительных экспериментов видно, что при создании новых технических средств охлаждения воздуха можно ориентироваться на холодопроизводительность одного модуля холодильно-опреснительной установки в 500 - 600 кВт, в этом случае два – четыре модуля обеспечат покрытие основного диапазона требуемой мощности большинства глубоких шахт.

Особенностью выпускаемых сегодня в мире шахтных холодильных машин является применение теплообменных аппаратов, рассчитанных на значительные перепады температур. Разность температур воды на входе и выходе аппаратов составляет до 15÷20 °С. Это отражает тенденцию к снижению расходов воды на конденсаторы и испарители (таблица 4.1.), однако и ограничивает температуру воды на входе в конденсатор или на выходе из испарителя. В этом плане шахтные холодильные машины отличаются от общепромышленных машин у которых перепад температур охлаждающей воды в конденсаторе составляет 3,3÷5,4 °С и хладоносителя в испарителе 3,0÷3,9 °С при холодильной мощности 400÷700 кВт.

Таблица 4.1. -

Расчетные параметры аппаратов шахтных холодильных машин

Тип холодильной машины	Q ₀ , мВт	Расход воды, м ³ /ч		Температурный перепад, °С		Температура воды, °С	
		на испарителе	на конденсаторе	на испарителе	на конденсаторе	на выходе из испарителя	на входе в конденсатор
21 ШМКТ-820-2-0 (Россия)	1,0	96	140	9,0	7,4	4	35
МХРВ-1-45 (Украина)	1,0	72	115	11,9	10,0	3	32
WKM-700 (Германия)	0,64	43	53	14,0	14,0	5	31
GVC-740 (Польша)	0,74	63	92	10,0	8,3	5	34
EWDK-490 (Германия)	0,57	55	32	8,9	20	6	30

4.2 Выводы по разделу

На основе проведения вычислительных экспериментов на компьютерных моделях, установлена холодопотребность выемочных участков глубоких шахт при существующих горнотехнических параметрах разработки и параметрах, которые могут быть достигнуты в перспективе. Показано, что имитационное моделирование систем «производственная среда – техника нормализации микроклимата» позволяет определить необходимую для нормализации тепловых условий холодопроизводительность средств охлаждения воздуха. Для большинства выемочных участков глубоких шахт эта величина лежит в диапазоне 300 ÷ 500 кВт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации решена научно-техническая задача, целью которой является совершенствование методов прогноза теплового режима горных выработок при искусственной обработке приточного воздуха и разработка промышленно и экологически безопасного способа нормализации тепловых условий в глубоких шахтах и рудниках, позволяющего обеспечить улучшение условий труда шахтеров, повышение безопасности применения техники кондиционирования воздуха и снижение воздействий на окружающую природную среду.

Выводы и результаты работы сводятся к следующему.

1. Проанализированы методики для прогноза тепловлажностных условий в горных выработках шахт, а также методы расчета и подбора параметров климатического оборудования для нормализации микроклимата на рабочих местах в шахтах. Произведен анализ данных замеров тепловлажностных параметров рудничного воздуха. Обобщены закономерности формирования тепловых условий в горных выработках глубоких шахт и предложена методика построения компьютерных моделей процессов тепломассопереноса в шахтах.

2. Обобщены закономерности формирования тепловых условий в глубоких шахтах и разработана математическая модель прогнозирования тепловлажностных параметров воздуха в горных выработках. На основе данной модели предложена методика построения компьютерных моделей для расчета процессов тепломассопереноса в шахтах.

3. Построены компьютерные модели для расчета тепловлажностных параметров вентиляционного воздуха в горных выработках, которые представлены в виде графических моделей в среде моделирования Simulink. Разработанные модули включены в графическую библиотеку Simulink.

4. Выполнен сравнительный анализ процессов тепломассообмена на выемочных участках некоторых глубоких шахт. Установлены зависимости и

законы вероятностных распределений для тепловлажностных параметров влажного воздуха на выемочных участках глубоких шахт.

5. Проведены вычислительные эксперименты по имитационному моделированию климатических условий в воздухоподающих, очистных и вентиляционных выработках. Определены параметры средств нормализации тепловых условий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хохолов, Ю.А. Математическое моделирование тепловых процессов в горных выработках шахт и рудников Севера / Ю.А. Хохолов, Д.Е. Соловьев; отв. ред. А.С. Курилко; Рос. акад. наук, Сибирское отделение, Ин-т горного дела Севера им. Н.В. Черского. – Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”, 2013.
2. Абрамов Ф.А. Моделирование вентиляционных сетей шахт / Ф.А. Абрамов, В.А. Бойко, Н.А. Фролов. – М.: Госгортехиздат, 1961.
3. Акутин К.Г. Управление воздухораспределением в шахтной вентиляционной сети / К.Г. Акутин, Е.И. Филиппович, Л.А. Шойхет. – М.: Недра, 1977. – 128 с.
4. Баранников Н.М. Стационарные установки рудников и шахт: Учеб. пособие / Н.М. Баранников. – Красноярск: Изд-во КГУ, 1985. – 196 с.
5. Брайчева Н.А. Методы расчета температуры вентиляционного воздуха подземных сооружений / Н.А. Брайчева, В.П. Черняк, А.Н. Щербань. – Киев: Наукова думка, 1981. – 183 с.
6. Венгеров И.Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. – Т. 1. Анализ парадигмы / И.Р. Венгеров. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 632 с.
7. Галкин А.Ф. Тепловой режим подземных сооружений Севера / А.Ф. Галкин; РАН, СО, ЯФ, Ин-т горного дела Севера. – Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма, 2000. – 304 с.
8. Микроклимат зданий и сооружений. Бодров В.И., Бодров М.В., Трифонов М.А., Чурмеева Т.Н. Нижний Новгород: Арабеск, 2001.
9. Теоретические основы создания микроклимата в помещениях. Полосин И.И., Новосельцев Б.П., Шершнев В.Н. Воронеж: Воронежский гос. арх.-строит. университет, 2005.
10. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Стефанов Е.В. С.-Пб: АВОК СЕВЕРО-ЗАПАД, 2005.
11. Вентиляция и кондиционирование воздуха: учебник. Петров Ю.С. Л: Судостроение, 1984.

12. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. М.: АВОК-ПРЕСС, 2002.
13. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981.
14. С.С. Кобылкин, О.В. Сологуб. Обзор существующих средств программного обеспечения для моделирования вентиляции подземных сооружений и шахт. -М.: ЮНИТИ, 2009.
15. Гусенцова Я.А., Андрийчук К.Н., Коваленко А.А., Соколов В.И. Системы вентиляции: моделирование, оптимизация. – Луганск: Издательство СЛУ им. В. Даля, 2005.
16. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом. (Утв. постановлением Госгортехнадзора России от 13.05.2003 № 30). – <http://www.znakcomplect.ru>.
17. Ельчанинов Е.А. Проблемы управления термодинамическими процессами в зоне влияния горных работ / Е.А. Ельчанинов. – М.: Наука, 1989. – 240 с.
18. Гусенцова Я.А., Иващенко Е.А., Коваленко А.А., Соколов В.И., Андрийчук Н.Д. Математическая модель аэротермических характеристик систем отопления и вентиляции. – Луганск: Издательство СЛУ им. В. Даля, 2005.
19. М. Федосеев. Экономико-математические методы и прикладные модели. -М.: ЮНИТИ, 1999.
20. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. М.:Наука, 1984.
21. Физическое моделирование инженерных процессов. Мочернюк Д.Ю. Львов.: Высшая школа, 1987.
22. Моделирование тепловых устройств. Кирпичев М.В., Михеев М.А. М.: Академия наук СССР, 1936.